

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de génie Mécanique**

**THESE DE DOCTORAT**

En Mécanique

Spécialité : Sciences des Matériaux

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME EXPERT DANS L'EVALUATION  
DE L'ENDOMMAGEMENT D'ELEMENTS DE STRUCTURE METALLIQUE  
CAS DE CORROSION ELECTROCHIMIQUE.  
DIAGNOSTIQUE & RECOMMANDATION

**Par**

**CHERIET Nabil**

**Devant le jury composé de :**

M. TEMMAR	Professeur, Université de Blida	Président
M. AZZAZ	Professeur, USTHB, Alger	Examineur
N. MOULAI MOSTEFA	Professeur, Université de Médéa	Examineur
M. OUCHABANE	Maitre de Recherche, CDTA, Alger	Examineur
N. BACHA	Professeur, Université de Blida1	Directeur de Thèse

Blida, Février 2019

## ملخص

إن تقييم مدى ملاءمة التدخل في الأضرار المسببة للتآكل على مستوى أنابيب نقل البترول ليست مهمة بسيطة. ومع ذلك يتطلب تحسين التدخلات من أجل إنجازها الحقيقي وتحليل هذه الأخطار التي لا تزال معقدة لدى SONATRACH حتى بالنسبة للمهندسين من ذوي الخبرة المسؤولين عن تقييم حالة المنشآت. ولذلك فمن الأهمية بمكان تطوير أداة أو منهجية تصنف أضرار التآكل لهذه المنشآت بطريقة عقلانية ومتجانسة، من أجل توجيه المهندس في صنع القرار الموضوعي. كجزء من هذا العمل. تم تطوير نظام خبير لتقييم الأضرار التالفة لخطوط الأنابيب، هو نظام مساعد للقرار تحت اسم ECOR الذي يساعد المهندس في مهمته لتقدير درجة الضرر على مستوى أنابيب الهياكل المعدنية. هذا النظام الخبير يسمح بإعطاء معامل حدة خاص يناسب درجة الخطر لكل حالة باستخدام مقياس للمؤشرات التي تمثل في درجة شدة لكل نوع من أنواع الضرر (ثقب، وفوهة، وفقدان سمك وكراك) يمكن تطويرها على عنصر الأنابيب المعدني لتحديد ما إذا كان ينبغي إعادة تأهيل الأنابيب بواسطة طرق الإصلاح للاستخدام المستقبلي أو حلول أخرى، ولشرح "لماذا" هناك حاجة إلى هذه المعلومات للوصول إلى حلول واقتراحات.

## RESUME

L'évaluation de la pertinence d'une intervention sur une installation métallique d'une conduite d'hydrocarbures n'est pas une tâche simple. Cependant, à SONATRACH, l'optimisation des interventions quant à leur réelle urgence nécessite des analyses qui demeurent complexes même pour les ingénieurs expérimentés chargés de l'évaluation de l'état des installations. Il est alors crucial de développer un outil ou une méthodologie qui classifie les endommagements de ces installations de façon rationnelle et homogène, afin d'orienter l'ingénieur dans une prise de décision objective. Dans le cadre de ce travail, un système expert pour l'évaluation des dommages corrosif des conduites (pipelines) a été développé ; c'est un système d'aide à la décision qui permet d'assister l'ingénieur dans sa tâche d'estimation du degré d'endommagement d'éléments de structures métalliques. Le système ECOR, acronyme de Estimation des dommages CORrosifs de structures métalliques de pipelines, permet d'attribuer qualitativement un degré d'endommagement de l'élément de structure en utilisant une échelle d'indices qui représente le degré de sévérité de chaque type de dommage (piqûre, cratère, perte d'épaisseur et fissure) pouvant être développé sur l'élément pipeline., de déterminer si un élément doit être réhabilité moyennant des méthodes réparation pour une utilisation future ou remplacé et d'expliquer « pourquoi » une information est nécessaire et « comment » une conclusion est déduite.

## ABSTRACT

Assessing the suitability of an intervention on the metallic pipelines used for the transport of hydrocarbons is not a simple task. However at SONATRACH, optimization of the interventions as to their real urgency requires analyses that remain complex even for the experienced engineers in charge of the supervision of such installations. It is then crucial to develop a tool or a methodology that classifies the damage of these installations in a rational and homogeneous way, in order to help the engineer for making objective decisions. As part of this work, an expert system for evaluating corrosive damage to pipelines has been developed; it is a decision support system that assists the engineer in his task of estimating the degree of damage of the structural elements. The ECOR system, an acronym for Corrosion Estimation of Metallic Pipeline Structures, qualitatively assigns a degree of damage to the structural element using a scale of indices that represents the degree of severity of each type of damage (Pickering, crater, loss of thickness and crack) that can be developed on the metallic pipe element. It is employed to determine whether an element should be rehabilitated by repair methods for future use or its replacement, and to explain "why" an information is needed and "how" a conclusion is deduced.

**Mots clés :** Inspection, endommagement corrosif, système expert, structure métallique pipeline

# Remerciements

*Ma reconnaissance se tourne en premier lieu vers ALLAH le tout Puissant.*

*C'est avec un grand plaisir que, j'adresse mes sincères remerciements à L'égard du professeur BACHA Nacer-Eddine mon encadreur pour sa disponibilité et sa contribution dans ce travail.*

*Je tiens à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance au Dr SKENDER pour sa participation et ses encouragements dans l'élaboration de mon projet.*

*Aussi je tiens énormément à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance pour toute l'équipe de travail d'engineering de l'entreprise Sonatrach, pour leur participation et leurs encouragements dans l'élaboration de mon projet.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury Pr TEMMAR, Pr AZZAZ, Pr MOULAI MOSTEFA et Dr OUCHABANE pour avoir acceptés d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon grand respect.*

*Mes remerciements à ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de mon projet.*

*Je n'achèverai pas sans avoir exprimé des remerciements envers ma cher Famille pour leur soutien et encouragements dans la réalisation de mon projet.*

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b><u>Chapitre 1</u></b>	
<b>NOTION D'ENDOMMAGEMENT DES PIECES METALLIQUES</b>	
1-1. Introduction .....	5
1-2. Endommagement corrosif des installations de production pétrolière.....	7
1-1-1. Prévision de l'endommagement corrosif.....	7
1-1-2. interprétation de l'endommagement .....	11
1-3. Aperçu sur les aciers .....	12
1-4. Les aciers inoxydables .....	13
1-3-1. Les différents types d'aciers inoxydables .....	14
1-3-2. Influence des éléments d'addition sur la structure des aciers .....	15
1-3-3. Sensibilité des aciers inoxydables à la corrosion .....	16
<b><u>Chapitre 2</u></b>	
<b>TECHNIQUE ET METHODES D'INSPECTION</b>	
2-1. Introduction .....	19
2-2. Rôles de l'inspection .....	19
2-3. Objectif de l'inspection .....	19
2-4. Périodes de l'inspection .....	20
2-4-1. Les inspections réglementaires .....	20
2-4-2. Les inspections pendant la marche .....	20
2-4-3. Les inspections pendant l'arrêt accidentel .....	21
2-5. Méthodes de contrôle .....	21
2-5-1. Contrôle non destructif .....	21
2-5-2. Contrôle destructif .....	22
2-6. Plan d'inspection et de suivi de corrosion .....	27
2-7. Conclusion .....	29
<b><u>Chapitre 3</u></b>	
<b>GENERALITES SUR LA CORROSION</b>	
3-1. Aspects théoriques sur la corrosion des métaux .....	30
3-2. Définition .....	31
3-3. Processus de corrosion .....	31
3-4. Corrosion électrochimique .....	32
3-5. Les aspects de corrosion .....	34
3-5-1. Corrosion généralisée .....	34
3-5-2. Corrosion localisée .....	34
3-5-3. Corrosion par piqûre .....	34
3-5-4. Corrosion intergranulaire .....	35

3-5-5. Corrosion galvanique .....	35
3-5-6. Corrosion fissurant sous tensions .....	36
3-5-7. Corrosion par usure mécanique .....	36
3-5-8. Corrosion sélective .....	36
3-5-9. Corrosion par crevasses .....	36
3-5-10. Corrosion biochimique .....	37
3-6. Les facteurs de la corrosion .....	38
3-7. Influence des principaux paramètres physicochimiques sur la vitesse de corrosion ..	40
3-7-1. Caractéristiques cristallographiques .....	40
3-7-2. Caractéristiques chimiques .....	40
3-7-3. Passivation .....	42
3-8. Protection contre la corrosion .....	43
3-8-1. Formes adaptée des pièces .....	44
3-8-2. Le choix des matériaux .....	44
3-8-3. Protection par revêtement .....	44
3-8-4. Protection par inhibiteur .....	45
3-8-5. Protection électrochimique.....	47

## **Chapitre 4**

### **GENERALITES SUR LES SYSTEMES EXPERTS**

4-1 Introduction .....	50
4-2 Domaines de l'intelligence artificielle .....	50
4-3 Définition d'un système experts .....	51
4-4 Architecture générale d'un système expert.....	53
4-5 Les intervenants.. .....	56
4-6 Les techniques de présentations de la connaissance .....	56
4-7 Développement d'un système expert.....	66
4-8 Résultats attendus d'un système expert .....	69
4-9 Systèmes experts dans le domaine des corrosions.....	70
4-3 Conclusion.....	71

## **Chapitre 5**

### **APPROCHE : ECOR EXPERT**

5-1 Présentation sommaire de ECOR : Expert.....	72
5-2 Consultation de ECOR .....	74
5-3 Approche d'évaluation des dommages.....	78
5-4 Résultats et discussion .....	83
5-4-1-1 Evaluation des dommages par piqûration.....	84
5-4-1-2 Evaluation de l'indice d'endommagement cratères de corrosion .....	88
5-4-1-3 Evaluation de l'indice d'endommagement par perte d'épaisseur .....	89
5-4-1-4 Evaluation de l'indice d'endommagement par fissuration .....	90
5-4-1-5 Evaluation de l'indice d'endommagement Total .....	94
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>97</b>

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>98</b>
---	-----------

## **ANNEXES**

Annexe 1 Interface utilisateur .....	103
Annexe 2 Base des faits.....	105
Annexe 3 Base des règles .....	109
Annexe 3 AHP .....	112

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig. 1-1</b>	Domaines liés au phénomène de corrosion .....	5
<b>Fig. 1-2</b>	Aspect macrographique d'une piqûre de corrosion sur la paroi d'un pipeline .....	8
<b>Fig. 1-3</b>	L'apparence d'un d'endommagement de fuite sur une conduite de pipeline .....	10
<b>Fig. 1-4</b>	Diagramme de phase fer-carbone .....	12
<b>Fig. 1-5</b>	Diagramme de POURBAIX pour le Fe à 25 °C .....	18
<b>Fig. 2-1</b>	Organigramme technique d'inspection et de suivi permanent et régulier des installations .....	28
<b>Fig. 3-1</b>	Schéma représentant le contact à l'interface métal / électrolyte ...	33
<b>Fig. 3-2</b>	Représentation schématique des différentes formes de corrosion	38
<b>Fig. 3-3</b>	Courbe intensité-potential réduite à sa composante anodique d'un métal passivable.....	43
<b>Fig. 3-4</b>	Groupes d'Inhibiteur .....	46
<b>Fig. 4-1</b>	Branches de l'informatique .....	51
<b>Fig. 4-2</b>	Architecture général d'un système expert.....	53
<b>Fig. 4-3</b>	Réseaux sémantiques .....	58
<b>Fig. 4-4</b>	Processus de développement d'un système expert .....	68
<b>Fig. 5-1</b>	Organigramme général de notre système expert .....	73
<b>Fig. 5-2</b>	Interface 1 .....	74
<b>Fig. 5-3</b>	Module 2 : estimation des dommages .....	76
<b>Fig. 5-4</b>	Le graphe d'héritage dans ECOR : expert .....	77
<b>Fig. 5-5</b>	Niveaux d'hierarchie de ECOR Expert .....	83

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 3-1</b>	Facteurs de corrosion .....	39
<b>Tableau 4-1</b>	Les deux parties d'une règle.....	59
<b>Tableau 5-1</b>	Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'à chacun d'entre eux sur la piqûration .....	85
<b>Tableau 5-2</b>	Indice & Sévérité des endommagements profondeur de piqûre....	86
<b>Tableau 5-3</b>	Indice & Sévérité des endommagements diamètre de piqûre .....	86
<b>Tableau 5-4</b>	Facteur de priorité entre la profondeur et le diamètre de piqûre ...	87
<b>Tableau 5-5</b>	Facteur de priorité & Facteur de pondération .....	88
<b>Tableau 5-6</b>	Sévérités et indices correspondant à l'endommagement par piqûration.....	88
<b>Tableau 5-7</b>	Indice & Sévérité des endommagements Etendue de cratère.....	89
<b>Tableau 5-8</b>	Indice & Sévérité des endommagements de pertes d'épaisseur....	89
<b>Tableau 5-9</b>	Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la fissuration .....	90
<b>Tableau 5-10</b>	Indice & Sévérité des endommagements par la sévérité de largeur de fissure .....	91
<b>Tableau 5-11</b>	Indice & Sévérité des endommagements densité de fissure.....	92
<b>Tableau 5-12</b>	Indice & Sévérité des endommagements par la forme de l'extrémité de fissure .....	92
<b>Tableau 5-13</b>	Facteur de priorité entre largeur et densité de fissure .....	93
<b>Tableau 5-14</b>	Facteur de priorité & Facteur de pondération .....	93
<b>Tableau 5-15</b>	Indice & Sévérité des endommagements de fissuration .....	94
<b>Tableau 5-16</b>	Facteur de priorité des différents types de dommages observés sur un élément structure.....	95
<b>Tableau 5-17</b>	Indice total calculé selon l'équation 5 et la sévérité associée .....	95
<b>Tableau 5-18</b>	Etude de cas - scénario:- Estimation de dommage sur un pipeline	96





# 1. Introduction

Il est bien connu que la corrosion est un problème majeur, qui cause des pertes énormes à l'industrie. L'industrie pétrolière est particulièrement touchée, en raison du caractère corrosif des produits (gaz, pétrole brut et eau) manipulés ou traités dans différentes phases de la chaîne de production, et aussi en raison des conditions opératoires sévères (pression, température et vitesse d'écoulement).

Les implications des défaillances dues à la corrosion vont au-delà des manques à gagner, et des coûts des remplacements, l'inflammabilité et la toxicité des produits véhiculés, souvent à des pressions élevées, peuvent porter des préjudices graves à la sécurité des personnes et à l'environnement [1]. Pour toutes ces raisons le besoin pour la fonction inspection et suivi de la corrosion devient une nécessité absolue.

La corrosion est le résultat de l'action qu'exerce un réactif liquide ou gazeux sur un métal ou un alliage, sa forme la plus connue est la rouille du fer exposé à l'air humide. Elle présente une grande importance étant donné les conséquences qu'elle a dans des domaines très variés de l'activité humaine. Dans le domaine économique, par exemple, les dommages causés par la corrosion ont une incidence non négligeable sur l'établissement des prix de revient. C'est ainsi que l'on estime à 20% environ de la production la quantité d'acier qui est chaque année utilisée pour le remplacement des installations de toutes sortes détruites par la corrosion. Le remplacement du matériel corrodé constitue donc, pour l'industrie en particulier, une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations, nécessaire pour effectuer les réparations.

Les manifestations de la corrosion sont très diverses et leur processus de formation aussi [2]. Donc il faut faire face à ce phénomène destructif et il faut prévoir les problèmes avant leurs arrivés et savoir comment y remédier à travers des inspections faites par des experts qui ont acquis une longue expérience pendant des années de services, mais le problème qui se pose c'est que ces gens ne sont pas disponibles a tout moments car ils ne sont pas nombreux et aussi car ils partent en retraite, donc pour faciliter la tâche d'expertise, une approche d'outil informatique doit être utilisé pour faciliter le diagnostic et pour donner ainsi aux nouveaux ingénieurs l'opportunité de bénéficier de l'acquis des

praticiens d'homme de chantier et surtout pour leur éviter de commettre les mêmes erreurs que leurs prédécesseurs.

Une fois que la cause de la dégradation est connue et que l'évaluation de l'étendue des dommages est effectuée lors de l'inspection, il est nécessaire de prendre une décision quant à la nécessité d'effectuer des travaux sur la structure ou de procéder au remplacement de la pièce endommagée

L'évaluation de la pertinence d'une intervention sur une installation n'est pas une tâche simple. En effet, ce n'est pas parce qu'une structure est endommagée qu'elle requiert forcément des réparations ou d'entretien. Chaque processus de dégradation survient de façon différente sur les aciers, et en plus, ses conséquences sur la fonctionnalité, sécurité et intégrité des installations de production des hydrocarbures dépendent de son évolution dans le temps, de sa concomitance avec d'autres détériorations ainsi que des conditions auxquelles est soumise la structure [2,3].

Cependant, l'optimisation des interventions quant à leur réelle urgence nécessite des analyses qui demeurent complexes même pour les ingénieurs expérimentés chargés de l'évaluation de l'état des installations.

Il est alors crucial de développer un outil ou une méthodologie qui classe les endommagements de ces installations de façon rationnelle et homogène, afin d'orienter l'ingénieur dans une prise de décision objective.

L'objet de notre travail est de développer l'architecture d'un système expert à base de règles qui permettra d'accomplir les tâches suivantes :

- Estimation des dégâts occasionnés aux éléments de structure métallique.
- Détermination de la sévérité de l'endommagement avec suggestions des actions et mesures à prendre telles ou telles que les procédures de réhabilitation qui s'imposent afin d'assurer un niveau acceptable de sécurité.
- Acquérir une technologie système expert.

Le but recherché c'est d'accueillir, de stocker et enfin d'analyser la connaissance d'ingénieurs ayant capitalisé une expérience dans estimation de l'endommagement d'éléments de structure métallique, pour enfin la restituer à travers un système à base de connaissance qui se traduit donc par un ensemble de règles déductives qui reflètent par leurs enchaînement le raisonnement des experts humains face à un problème d'expertise.

Dans le cadre de ce travail, nous avons abordé l'analyse de l'endommagement corrosif des pipelines (piping) des installations de production des hydrocarbures sur des aciers au carbone, à travers Le système ECOR : Expert acronyme de l'Estimation des dommages CORrosifs des conduite (pipeline) d'installation de production d'hydrocarbure a été développé à l'aide d'un système expert vide (Shell) appelé KBS (knowledge based system) [4], avec une base objet et une base de règles, représentation de la connaissance que l'on a acquis d'une part à travers une littérature qui a englobé des méthodes d'estimation de dommages et d'autres part à partir des résultats expérimentaux obtenus [5].

Le système ECOR est un outil informatique de support décisionnel destiné à améliorer l'évaluation des dommages corrosifs, la protection et réparation des organes de pipeline d'installation de production d'hydrocarbure. Son objectif principal est d'optimiser le processus de prise de décision, en fournissant de manière ordonnée à l'utilisateur les informations et le savoir-faire les plus récents relatifs aux dégradations corrosives des matériaux métalliques [6]. En effet, ce logiciel estime la sévérité des détériorations présentes dans les structures des pipelines, et qui aura la possibilité par une autre implémentation agir les procédures de réparation les plus appropriés. Pour ce faire, le système utilise une approche intégrée et systématique en deux étapes successives: un module de diagnostic un module d'estimation des dommages et enfin un module de réparation à développer.

Notre thèse est structurée selon les thèmes suivants :

Dans le premier chapitre, on entame la prévision et la détection de l'endommagement corrosif, tout en expliquant l'influence de la structure métallique sur la corrosivité des aciers au carbone qui sont utilisés dans l'industrie pétrolière, et aussi étudier les facteurs de la corrosion liés aux matériaux ainsi que les moyens de détection des dommages ; dans ce chapitre on étudie encore la sensibilité des aciers à la corrosion.

Dans le deuxième chapitre on décrit le rôle de la prévision et de la détection des endommagements et aussi les méthodes d'inspection et de suivi par les ingénieurs.

Dans le troisième chapitre on étudie le phénomène de corrosion ainsi que ses types, ses aspects, les facteurs influençant sur la corrosion et les remèdes utilisés. Dans le quatrième chapitre on fournit une vue d'ensemble sur les systèmes experts en corrosion, leurs rôles, leurs domaines d'application.

Dans le cinquième chapitre on a examiné l'approche ECOR développée dans l'analyse des dégâts. On présente la méthodologie de l'approche d'estimation des endommagements survenus à partir d'un système indiciel qui calcule l'indice total de sévérité d'endommagement du pipeline, et enfin on termine par une conclusion.

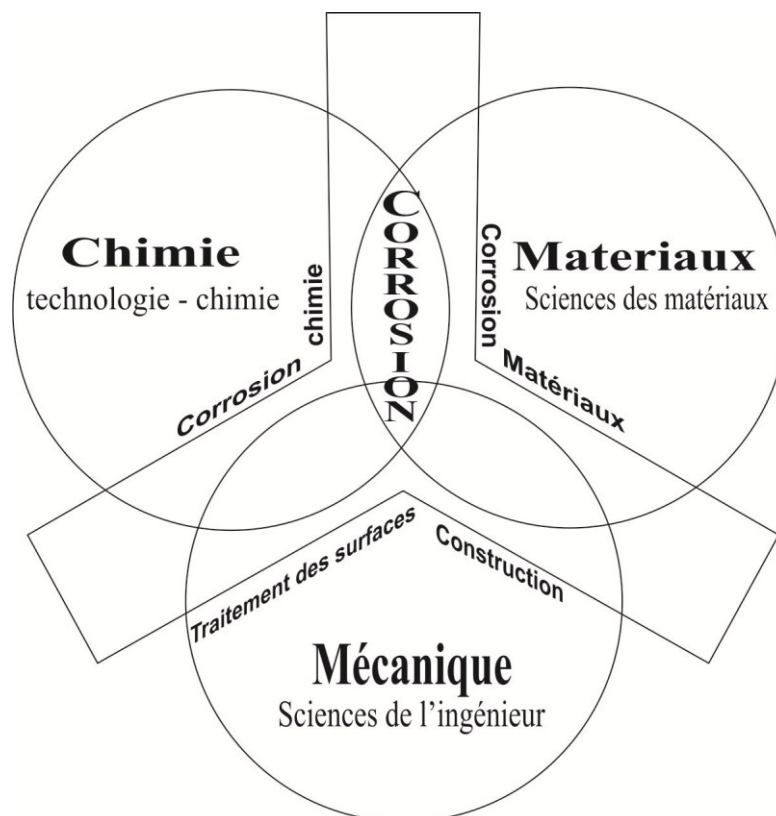
# **CHAPITRE 1**

## NOTIONS D'ENDOMMAGEMENT DES PIÈCES MÉTALLIQUES

## 1.1 INTRODUCTION

On sait depuis longtemps déjà que les environnements agressifs (aqueux) peuvent conduire à une diminution conséquente des durées de vie des métaux et alliages dans les installations métalliques. La corrosion assiste fréquemment l'endommagement des pipelines dans l'industrie des hydrocarbures. L'un des mécanismes d'endommagement le plus couramment observé s'initie d'abord par la formation des piqûres ou cratère, puis par leur croissance et enfin par la formation de fissures. Dans ce genre de problème d'endommagement il y a compétition et parfois synergie entre les mécanismes d'endommagement purement mécaniques et les mécanismes purement électrochimiques.

Il est communément admis que Les problèmes l'endommagement corrosif font intervenir à la fois le domaine de la chimie, le domaine des sciences des matériaux et le domaine de la mécanique voir figure ci-dessous



**Figure 1.1** Domaines liés au phénomène de corrosion [7].

L'endommagement corrosif en service de composants métalliques ou d'organes stratégiques nécessaires au bon fonctionnement d'un équipement ou installation industrielle a de lourdes répercussions sur l'exploitant en termes de non production.

Il est bien connu que la corrosion est un problème majeur, qui cause des pertes énormes à l'industrie. L'industrie pétrolière étant particulièrement touchée, en raison du caractère corrosif des produits manipulés ou traités dans les différentes phases de la chaîne de production et aussi en raison des conditions opératoires sévères (pression, température et vitesse d'écoulement).

Tout d'abord étudiant les facteurs de la corrosion liée aux matériaux et qui dépendent des paramètres suivants :

- *La composition* : la composition nominale mais aussi les teneurs en résiduels. C'est en général à partir de la composition nominale des alliages que l'on raisonne pour en prévoir le comportement. Cela peut être souvent insuffisant car des éléments résiduels peuvent avoir des effets déterminant, souvent, mais pas toujours négatif. On peut citer l'effet très défavorable de teneurs résiduelles élevées de soufre sur les aciers et les aciers inoxydables mais aussi l'effet favorable de la présence de traces d'arsenic sur la résistance à la désincification de certains laitons.
- *La structure* du matériau est importante car selon son histoire thermomécanique, un matériau peut avoir des comportements très différents dans un même milieu : la structure cristallographique, sa taille et sa texture, l'écroutissage, la présence de phases d'inclusions et de précipités, la possibilité de ségrégations, en particulier inter granulaire sont des facteurs qui peuvent être décisifs.
- *L'état de surface* géométrique et surtout physico-chimique est très souvent déterminant pour la résistance à la corrosion d'un matériau dans un milieu. La rugosité mais aussi des pollutions ou des variations de compositions superficielles (par exemple liées à une oxydation pendant un traitement thermique) peuvent avoir des effets majeurs.
- *La présence des contraintes mécaniques* qui sont l'origine des phénomènes de fissuration en milieu corrosif, peuvent aussi modifier de façon significative certains processus de corrosion, notamment la corrosion localisée (piqûres). [7]



Pour analyser le comportement en service d'un matériau il faudra donc s'attacher à examiner le comportement du matériau de base mais aussi prendre en compte toutes les conséquences des opérations de mises en œuvre.

## **1.2. ENDOMMAGEMENT CORROSIF DES INSTALLATION DE PRODUCTION PETROLIERE**

Les problèmes les plus importants posés par la corrosion dans les puits et les conduites (pipeline) en acier au carbone ou en acier inoxydable sont causés par des substances chimiques conduisant à une acidification de l'eau continue dans les bruts ou le gaz naturel. Ces corrosions apparaissent quand l'eau contenue dans le brut entre en contact avec la paroi métallique pendant un temps suffisant pour pouvoir amorcer une corrosion localisée et ce, quelle que soit la teneur en eau de l'effluent [1,8].

Ce problème est du même type pour les puits à gaz qu'ils produisent de l'eau de gisement (salée) ou de l'eau par condensation.

Ces facteurs conférant à l'eau son agressivité sont :

- Le CO<sub>2</sub> dont la fonction est d'abaisser le pH provoquant une corrosion chimique qui dans le cas des gaz est appelée « sweet corrosion »
- L'H<sub>2</sub>S provoque des phénomènes de corrosion variés suivant la nature des métaux et les conditions de production (voir figure 1-2. a et b)
- Les bactéries essentiellement bactéries sulfato-réductrices.

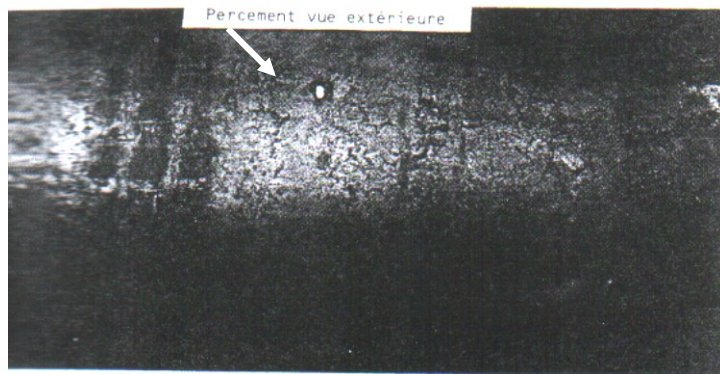
### **1.2.1 Prévion de l'endommagement corrosif**

C'est difficile de prévoir une corrosion car ce phénomène est tributaire de paramètres dont il est difficile de définir l'incidence exacte. L'apparition du phénomène de corrosion dépend de la nature des matériaux métalliques, de la nature des effluents transportés et des conditions de service. [6]

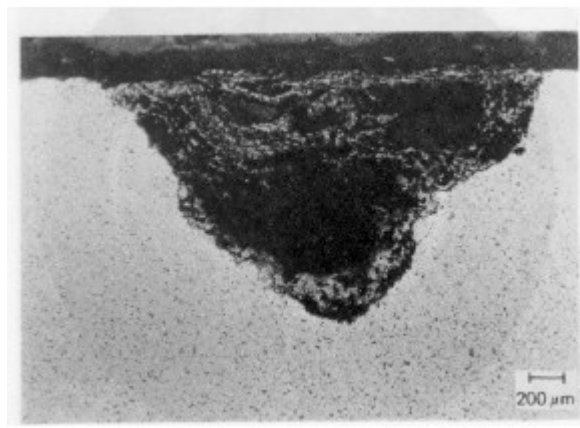
Pour prévoir une corrosion d'une installation donnée il faut prendre en considération les éléments suivants :

#### **a) L'analyse des effluents**

Dans la production du pétrole ou du gaz c'est l'eau qui est à l'origine de la corrosion donc il est nécessaire de faire une analyse complète de l'eau produite : pH , Ca<sup>2+</sup> , Mg<sup>2+</sup> , Na<sup>+</sup> , K<sup>+</sup> , Li<sup>+</sup> , Fe<sup>2+</sup> , Fe<sup>3+</sup> , Cl<sup>-</sup> , SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> , HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> , CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> , gaz dissous (CO<sub>2</sub> , H<sub>2</sub>S), présence de Bactérie sulfations réductrices.



**a-** perçement de la paroi d'une pipe par une piqûre de corrosion



**b-** Profil macrographique d'une piqûre de corrosion sur la paroi intérieure d'un pipeline

**Figure 1-2 :** Aspect macrographique d'une piqûre de corrosion  
Sur la paroi d'un pipeline [1]

### **b) Conditions de service :**

On prendra en compte :

- Le débit
- La température,
- La pression
- La variation de ces deux paramètres le long d'une installation
- Le régime d'écoulement dans les conduites ainsi que les temps d'arrêts
- L'aptitude à l'émulsion et à la décantation de l'eau dans l'huile.

### **c) Essais de laboratoire et in situ :**

Après avoir défini les conditions de service et effectué l'analyse des effluents on doit chercher au laboratoire ce qui risque de se passer réellement.

Ces essais ont pour but :

- Soit de démontrer que le fluide que l'on a estimé peu corrosif (aisances de H<sub>2</sub>S et de bactéries, Pco<sub>2</sub> < 0.5 bar, pH voisin de la neutralité, résistivité assez élevée).
- Soit de déterminer le type de corrosion et de recherche des solutions.

Des essais in situ devaient compléter les analyses au laboratoire.

### **d) Détection de l'endommagement**

Certaines corrosion sont apparentes : fuites, geysers, baisse de production, pollution et d'autres peuvent être décelées en raison de leur incidence sur l'exploitation, par exemple:

- mise en pression de l'annulaire pouvant indiquer une communication entre le tubing et le casing.
- Baisse de production pouvant provenir de fuites dans le réseau de collecte ou dans les tubings.
- Apparition de dépôts dans certains endroits préférentiels (vannes, filtres).

Cependant, des corrosions graves affectent toute une installation, peuvent rester cachés longtemps avant de se manifester de manière catastrophique.

En conséquence, quel que soit l'état apparent d'une installation il y a lieu de la contrôler. Ceci implique une surveillance systématique et bien adaptée à l'installation [6].

**e) Moyens de détection :**

Pour caractériser l'agressivité d'un milieu corrosif vis à vis du métal, on dispose d'une panoplie de méthodes. Nous donnons ci-après un bref aperçu sur les plus répandues d'entre elles [7].

➤ **Sonde électrique :**

La résistance électrique d'un échantillon métallique augmente lorsque sa section diminue. Cette propriété physique des métaux est utilisée pour le suivi de la corrosion dans les installations industrielles. La perte du métal due à la corrosion engendre une augmentation de résistance électrique, cette variation de la résistance électrique de l'échantillon est captée et traduite en termes de vitesse de corrosion.

➤ **Sonde électrochimique :**

Les sondes électrochimiques mesurent des vitesses de corrosion instantanées. Les équipements de mesure de la vitesse de la corrosion par les méthodes électrochimiques ont été conçus sur la base des équations fondamentales de l'électrochimie. La résistance électrochimique à des intervalles de potentiel bien déterminés est mesurée, elle est ensuite convertie en vitesse de corrosion.

➤ **Sonde d'hydrogène :**

La réaction cathodique dans un processus de corrosion produit de l'hydrogène. Plus la vitesse de corrosion est importante plus la quantité d'hydrogène produite à la cathode est importante. Les sondes à hydrogène exploitent cette caractéristique, elles adsorbent l'hydrogène.

➤ **Sondes à hydrogène :**

C'est un tube en acier creux à parois minces, l'hydrogène monoatomique crée les réactions de corrosion à la surface du tube diffuse à travers sa paroi. La présence d'hydrogène est détectée par jauge de pression à l'intérieur de la sonde.

➤ **Coupons :**

C'est la technique la plus ancienne et plus fiable. Elle consiste à exposer des témoins de corrosion dans le passage du fluide corrosif, les retirer après une période déterminée. L'examen de ces témoins permet de donner une idée sur la corrosivité du milieu. Les témoins de corrosion sont des morceaux de métal de forme standard et de même nuance que le métal utilisé qui sont préparés, insérés, retirés et analysés après retrait selon des

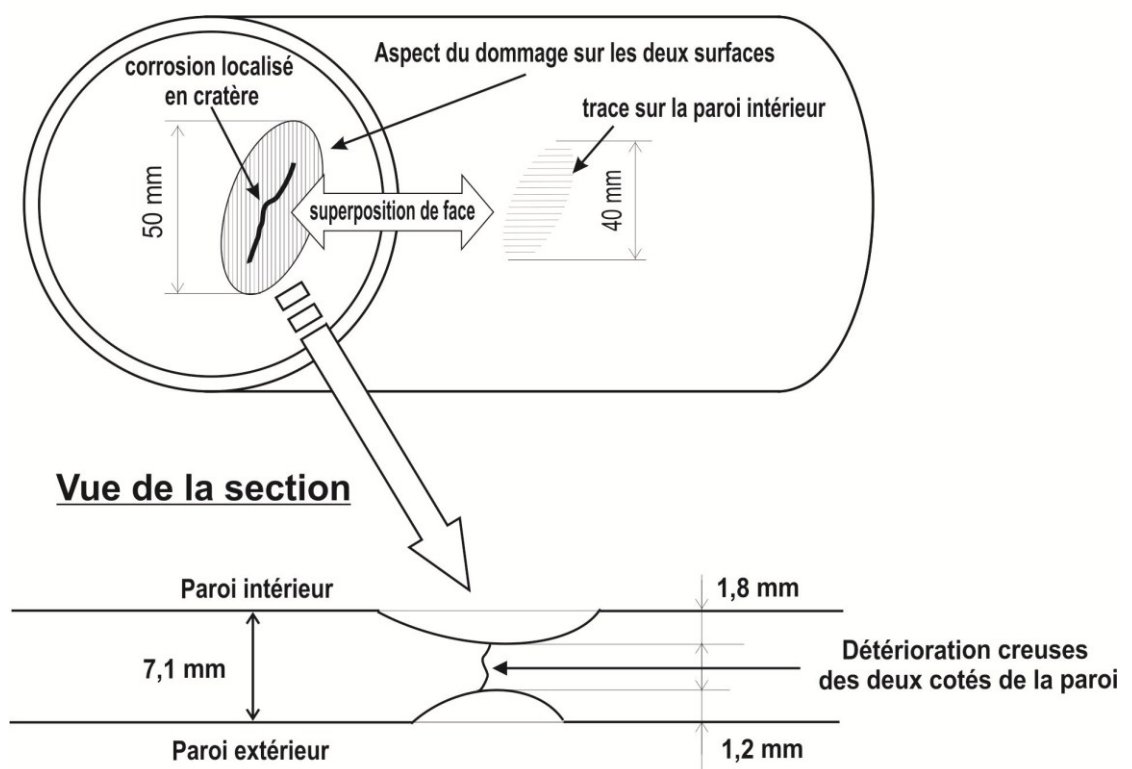
procédures normalisées. L'expression et l'interprétation des résultats s'effectuent aussi selon des procédures standard.

### 1.2.2 Interprétation de l'endommagement

Après avoir détecté l'endommagement, il est nécessaire de le quantifier et interpréter l'ensemble des résultats d'inspection du site contrôlé. Autrement dit :

- Comparer les résultats obtenus avec ceux de l'inspection précédente ou les données concernant les limites de sécurité.
- Interpréter les résultats en montrant les conditions de service, les causes et la gravité des endommagements.
- Evaluer l'endommagement en calculant la vitesse de corrosion, perte d'épaisseur et le taux de corrosion comparé aux épaisseurs minimales admissibles ainsi que la durée de vie restante. (Voir figure 1-3)

#### Aspect d'un dommage de fuite sur un pipeline



**Figure 1-3 :** Apparence d'un d'endommagement de fuite sur une conduite de pipeline

### 1.3 APERÇU SUR LES ACIERS

L'acier est un alliage composé essentiellement de fer contenant jusqu'à 2% de carbone en masse (au delà on parle de fonte) voir figure 1-4, et éventuellement d'autres éléments. La présence de carbone rend progressivement l'acier plus dur, mais plus cassant.

On distingue plusieurs types d'aciers selon leur structure cristallographique : [9]

- les aciers ferritiques, qui ont une symétrie cristalline cubique centrée (fer  $\alpha$ ).
- les aciers austénitiques, qui ont une symétrie cristalline cubique à faces centrées (fer  $\gamma$  ou austénite).
- les aciers martensitiques, qui contiennent des aiguilles de carbures (martensite).

Le diagramme fer-carbone permet de visualiser la forme d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone. Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non-alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent par exemple la forme  $\gamma$  (on parle d'éléments gammagènes : nickel et manganèse).

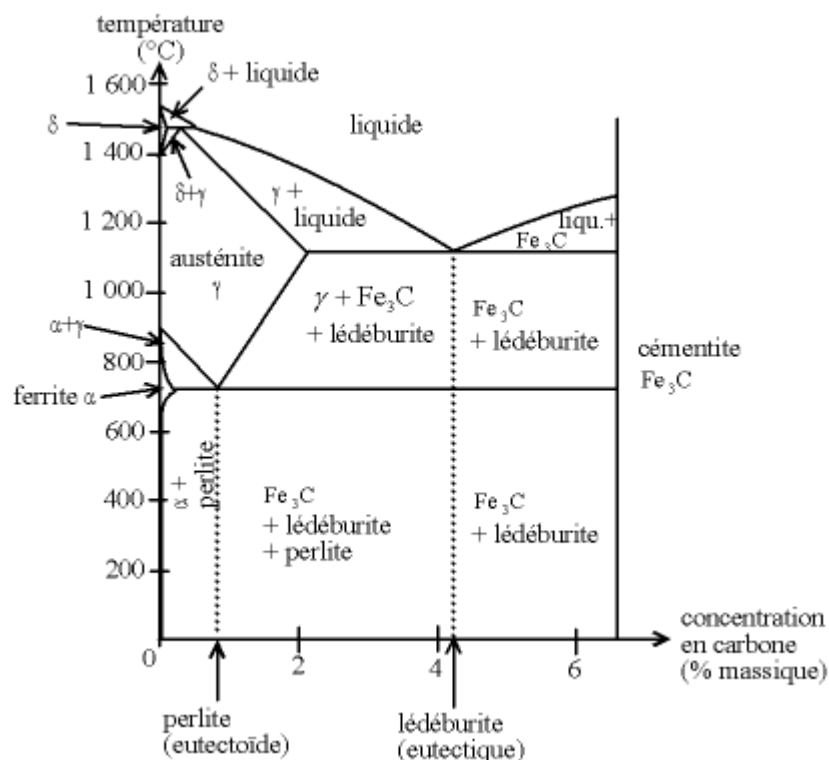


Figure 1-4 : Diagramme de phase fer-carbone [9].

Sur ce diagramme, on parle d'acier jusqu'à 1,7 % en masse de carbone, mais on peut avoir des aciers contenant plus de carbone lorsque l'on ajoute des éléments d'alliage.

Le carbone provient du procédé de réduction du minerai, qui se fait avec du charbon dans un haut-fourneau. Selon les propriétés désirées, on ajoute ou on enlève des éléments d'alliage :

- le bore renforce la cohésion des joints de grains, on en ajoute parfois en faible teneur (quelques centaines de ppm en masse) ;
- le soufre fragilise l'acier, par précipitation de sulfures aux joints de grains, on l'enlève donc lors de l'élaboration ;
- le nickel et le chrome protègent de la corrosion en venant former une couche passive, ils sont donc présents dans les aciers dits "inoxydables" ;
- mais aussi le magnésium, l'aluminium, le silicium, le titane, le manganèse, le cobalt, le zinc,....

Il existe des aciers faiblement alliés, à faible teneurs en carbone, et au contraire des aciers contenant beaucoup d'éléments d'alliage (par exemple, les aciers inoxydables typiques contiennent 10 % de nickel et 18 % de cuivre en masse)[10].

### **1-3 ACIERS INOXYDABLES**

L'acier inoxydable est essentiellement un acier qui contient peu de carbone et 10% ou plus de chrome selon son poids. L'ajout de chrome lui donne sa propriété de durabilité et de résistance à la corrosion. Plus la proportion de chrome et d'autres éléments tels que du molybdène, du nickel et de l'azote, augmente, plus ces propriétés sont multipliées.

Les aciers inoxydables sont des matériaux passivables sensibles à la corrosion par piqûres en présence d'espèces agressives spécifiques. La propriété de non corrosion de l'acier inoxydable provient de l'oxydation naturelle de la surface de l'alliage. Bien qu'extrêmement mince, la pellicule protectrice qui se forme à la surface adhère fortement ; elle est chimiquement stable (c'est-à-dire passive) dans un environnement qui lui procure suffisamment d'oxygène [10].

La clé de la durabilité et de la non corrosion de l'acier inoxydable tient à ceci ; même si elle est endommagée, la pellicule se réparera d'elle-même à condition d'être en contact avec l'oxygène. Contrairement à d'autres types d'acier qui souffrent de corrosion sur de grandes

surfaces, l'acier inoxydable, par son état de «passivité» est naturellement résistant à la corrosion.

Cependant, l'acier inoxydable ne peut être considéré comme «indestructible». Son état de passivité peut être rompu dans certaines conditions, ce qui occasionnera alors de la corrosion.

### **1-3-1 Différents types d'aciers**

Les aciers forment une famille d'alliages à base de fer et carbone en présence de certains éléments d'alliage. On distingue : [9]

#### **A. Aciers martensitiques**

Leur teneur en chrome va de 12 à 17% et ne contiennent pas de nickel leur résistance mécanique est élevée, mais leur résistance à la corrosion est la moins bonne des aciers inox, du fait de leur teneur faible en chrome et de leur teneur élevée en carbone.

#### **B. Aciers ferritiques**

Leur teneur en chrome va de 12 à 30% et ne contiennent pas de nickel Si on les maintient à des températures de 450°C et au delà, ils se fragilisent par grossissement des grains, formation de phase sigma (45%Cr, 55%Fe) et de phase alpha (90%Cr, 10%Fe). Les aciers à 17% de chrome résistent bien à l'oxydation, mais sont difficilement soudables. Les aciers contenant plus de 20% de chrome ont une excellente résistance à l'oxydation à haute température; ils sont dits réfractaires.

#### **C. Aciers austénitiques**

Ils contiennent de 7 à 20% de chrome et de 7 à 12% de nickel. Le plus courant est le 18-8 (18%Cr,8%Ni) Leur résistance à la corrosion est excellente même à haute température (900°C) et leurs propriétés mécaniques restent satisfaisantes même à très basse température. Les grains ont tendance à grossir au chauffage, sans que cela n'entraîne de fragilisation. Ils sont sensibles à la précipitation des carbures de chrome qui affecte la résistance mécanique et à l'oxydation. Une faible teneur en carbone, et l'addition de titane et de niobium ainsi que l'hypertrempe (chauffage vers 1000°C suivi d'un refroidissement à l'eau), permettent de limiter ce phénomène. L'addition de molybdène (2 à 4%) augmente leur résistance à la corrosion, en particulier dans les milieux chlorés.



#### **D. Aciers austéno-ferritiques**

Ils contiennent de 18 à 28% de chrome et de 6 à 9% de nickel. Excellent compromis entre les austénitiques et les ferritiques, leur limite d'élasticité est très supérieure à celle des austénitiques sans avoir la fragilité des ferritiques. Leur résistance à la corrosion est excellente, en particulier la corrosion sous contrainte.

#### **1-3-2 Influence des éléments d'addition sur la structure des aciers**

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneurs en carbone variant de 0,02 à 1% selon les nuances, de plus, il existe un certain nombre d'autres éléments d'alliage ayant certaines importances tel que Mo, Cu, Si, Ti,...ajoutés pour améliorer la tenue de la corrosion ou les propriétés mécaniques pour les alliages [9].

##### **➤ Action du Chrome**

Seul ou avec éléments, le chrome est la cause de passivation de l'acier et constitue au de la de 12%, éléments d'alliages essentiel des aciers inoxydables. Cet élément est susceptible de se dissoudre dans le fer et forme pendant l'échauffement des particules d'oxydes, ainsi le chrome lui confère l'inoxidabilité, l'addition de 5 à 8% de chrome accroît la tenue a la calamine jusqu'à 950 –1000°C et lorsque la teneur en chrome atteint 25% l'acier résiste à l'oxydation à 1100°C. La corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques est due a la formation de précipités intergranulaires de carbure de chrome  $Cr_{23}C_{26}$ .

##### **➤ Action du Nickel**

Le nickel est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliages des aciers inoxydables austénitiques, il améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance a la corrosion sous tension.

Ainsi l'addition du nickel et du chrome aux aciers inoxydables, l'un gammagène donc il stabilise la phase austénitique, l'autre alphagène donc il stabilise la phase ferritique, permet d'obtenir un état duplex austéno-ferritique dans certains aciers inoxydables, qui leurs confère une bonne résistance à la corrosion galvanique.

##### **➤ Action du Molybdène**

Il appartient a cette catégorie d'éléments accroissant la résistance à la corrosion et est donc fréquemment mis en œuvre dans les aciers au chrome hautement alliés et des aciers Cr-Ni

austénitiques, de fortes teneurs en molybdène atténuant la sensibilité à la corrosion perforante, et augmente aussi la résistance au fluage.

➤ **Action du Silicium**

Il accroît la stabilité et la résistance à l'usure, il augmente considérablement l'inoxidabilité à chaud et la résistance au détrimement d'une perte de plasticité.

➤ **Action de l'Azote**

La présence de l'azote diminue sensiblement la vitesse de précipitation de toutes les phases intermétalliques, c'est une des raisons, entre autre, de l'addition volontaire de l'azote dans la plus part des nuances austéno-ferritiques cela limite le risque de fragilisation lors du soudage.

Les éléments carburigène titane et niobium ont la propriété des carbures TiC et NbC plus stable que le carbure de chrome CrM<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ils sont utilisés pour éviter la formation de carbures de chrome, ces éléments ont une action alphasène importante dont il faut tenir compte.

### **1-3-3 Sensibilité des aciers inoxydables a la corrosion**

La corrosion localisée en milieu chloruré est un problème très important pour les aciers inoxydables. C'est ce qui a longtemps interdit leur utilisation en eau de mer et motivé le développement récent de nuances austénitiques et austéno-ferritiques de plus en plus alliées.

La résistance à la corrosion par piqûre et à la corrosion caverneuse d'un acier inoxydable ou d'un alliage à base nickel en milieux chlorurés dépend des mêmes paramètres :

- La composition : la résistance à la corrosion localisée augmente avec la teneur en chrome et en molybdène.
- La propreté inclusionnaire et la teneur en soufre car les inclusions, notamment celles qui contiennent de sulfures solubles ou hydrolysables constituent les sites d'amorçage des piques de corrosion.

Dans l'étude des phénomènes de corrosion, on s'intéresse principalement aux diagrammes E=f (pH) des métaux. L'étude de ces diagrammes pour un métal ou un alliage permet de repérer du point de vue thermodynamique les différents états d'oxydation du métal. Si L'on considère le système Fe – H<sub>2</sub>O à 25°C et sous la pression atmosphérique (voir figure 1-5), le domaine de stabilité thermodynamique du fer ne présente aucune partie commune avec

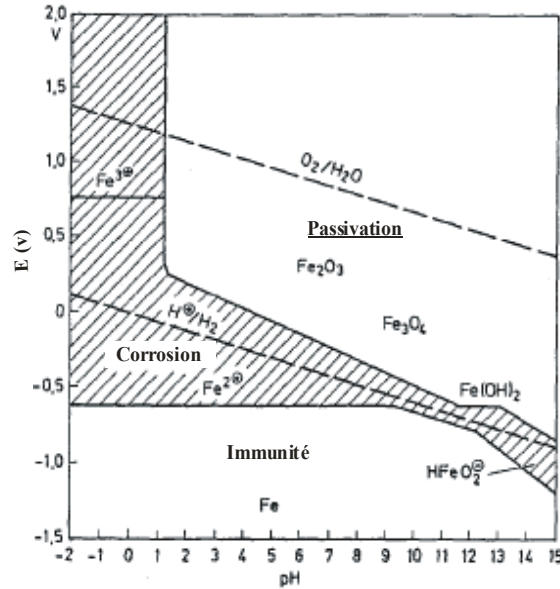
le domaine de stabilité de l'eau délimité par les droites a et b. On peut remarquer sur ce diagramme que Le fer apparaît comme non noble, instable en présence de l'eau, et provoque une corrosion,

Ce diagramme présente trois domaines essentiels :

- 1) **Domaine d'immunité** : le métal est exempt de toute transformation chimique lorsqu'il est en contact avec la solution. Une réduction des cations métalliques ainsi que celle de l'eau se produit.
- 2) **Domaine de passivation** : le métal est thermodynamiquement attaquant. Dans ce domaine, il se forme à la surface un film de composé solide plus au moins adhérent et donc plus au moins protecteur (oxyde ou hydroxyde). Dans certains cas, le film formé protège effectivement le métal d'une attaque ultérieure, on dira que le métal est à l'état passif.

Selon le diagramme (figure 1-5), la corrosion du fer est possible dans deux domaines qui correspondent à la dissolution du métal avec formation d'ions ferreux et hypoferrites.

- 3) **Domaine de corrosion** : dans ce domaine, la corrosion est thermodynamiquement possible. La présence d'hétérogénéité engendre la formation de micropiles en surfaces (oxydation sur l'anode et réduction sur la cathode, souvent dégagement d'hydrogène), ainsi les produits de corrosion passent en solution.



- (1) : domaine d'immunité
- (2) : domaine de passivation
- (3) : domaine de corrosion

Figure 1-5 : Diagramme de POURBAIX pour le Fe à 25 °C [9].

Il faut insister que les diagrammes de Pourbaix ne sont que des diagrammes d'équilibre. Ils permettent de déterminer les espèces stables, leur solubilité et les sens des réactions possibles. Mais, sauf si un métal est dans son domaine d'immunité, ils ne permettent de tirer aucune conclusion directe sur les phénomènes de corrosion, notamment sur des aspects cinétiques. Ils constituent néanmoins un outil indispensable à l'étude des problèmes de corrosion.

## **CHAPITRE 2**

### **TECHNIQUES D'INSPECTION EN CORROSION**

## **2.1 INTRODUCTION**

Les pipelines transportent de grandes quantités de liquide hydrocarbure et de gaz naturel, ils sont toujours exposés aux risques d'endommagements que ce soit par des interférences externes ou environnementales. Ces pipelines sont sujets aux fuites ou même aux ruptures qui sont considérées comme des défaillances de l'intégrité du pipeline. La présence d'une fissure ou d'une corrosion aussi infime soit elle, peut présenter un risque permanent pouvant provoquer de graves dégâts corporels et matériels. L'objectif de toutes les compagnies pétrolières est de réduire ces accidents survenus sur les réseaux pipeline dont les conséquences sont souvent désastreuses.

Dans ce chapitre, on se propose de décrire en premier lieu le rôle de la prévision et de la détection des endommagements causés par la corrosion, et en second lieu les méthodes d'inspections et de suivie par les ingénieurs corrosionnistes face au problème de l'estimation des dommages corrosifs. Nous ferons référence dans ce qui suit à la démarche suivie par les ingénieurs Algériens notamment ceux du la DP (Direction de la production – département sécurité- Sonatrach) et ceux du ENACT (entreprise nationale d'agrèage et de contrôle technique) lors du processus d'évaluation et d'inspection des installations et des équipements des champs de production d'hydrocarbures.

## **2.2 ROLES DE L'INSPECTION**

La fonction inspection a deux rôles essentiels :

- Le contrôle de qualité de l'équipement après fabrication ou après réparation.
- Le diagnostic de l'état des équipements après la mise en service et l'estimation de sa durée de vie.

Bien qu'ils paraissent différents, ces deux rôles sont étroitement liés ; le premier aspect est une condition préalable à l'accomplissement dans les règles de l'art du deuxième, car pour effectuer un diagnostic fiable de l'équipement après sa mise en service, il est nécessaire de connaître son état original, c'est à dire au stade de la fabrication. Il est important que les défauts présents dans l'équipement soient identifiés et localisés, l'idéal est bien entendu, d'avoir un équipement exempt de défauts [11].

## 2.3 OBJECTIFS DE L'INSPECTION

Les objectifs de l'inspection et suivi de la corrosion peuvent se résumer comme suit :

- Assurer l'exploitation des installations dans des conditions de sécurité optimales.
- Assurer l'exploitation des installations dans des conditions de fonctionnement optimales.
- Réduire au minimum les arrêts dus aux défaillances imprévues.
- Prolonger le plus longtemps possible la durée d'exploitation avant l'arrêt préventif.
- Réduire les coûts de la maintenance.

## 2.4 PERIODES DE L'INSPECTION

Les périodes d'inspection sont, soit imposées par la loi comme c'est le cas des inspections réglementaires pendant les arrêts programmés, soient des inspections qui génèrent des données pour la maintenance préventive et la maintenance prédictive [12].

### 2.4.1 Les inspections réglementaires :

Selon la réglementation officielle, deux groupes importants d'équipements sont assujettis.

- Canalisation.
- Appareils à pression de gaz.

Les cycles des inspections réglementaires sont de trois ans pour les visites internes et dix ans pour les épreuves hydrauliques [13].

1. **L'inspection triennale** : Elle est caractérisée par les visites intérieures des capacités précédées des opérations d'isolement, inertage, lavage. Les inspections effectuées doivent répondre aux méthodes de contrôle non destructif.
2. **L'inspection décennale** : Elle est caractérisée par des visites intérieures et des épreuves hydrostatiques, précédées des opérations d'isolement, inertage, lavage et nettoyage. Les opérations d'inspection avant et après lavage obéissent aux mêmes dispositions de contrôle non destructif que pour l'inspection triennale.

### 2.4.2 Les inspections pendant la marche

L'apparition d'appareils à ultrasons permettant de relever les épaisseurs de parois métalliques, l'amélioration des outils permettant d'effectuer des radiographies a permis aux

méthodes d'inspection d'arriver à un troisième stade, celui de l'inspection des unités en marche. On peut aujourd'hui affirmer que le fait d'utiliser les appareils modernes permettant d'effectuer des mesures non destructives rapides, précises et nombreuses, permet dans la majorité des cas de définir avec une précision suffisante les différents types de défauts même microscopiques, aussi d'évaluer la vitesse de corrosion et de diminuer ainsi de façon considérable les défaillances inopinées des équipements [14].

L'inspection pendant la marche permet d'avoir une image claire et fiable sur l'état actuel des équipements, en se basant seulement sur les résultats des contrôles non destructifs effectués pendant la marche (sans arrêter l'unité), il s'agit d'un suivi régulier et continu. Ce type de suivi a les avantages suivants :

- Connaissance dans le temps, de l'état des installations.
- Programmation non gênante pour la production.

### **2.4.3 Les inspections pendant l'arrêt accidentel**

L'inspection s'effectue juste après la panne non prévisible. Le travail de l'inspection se limite dans ces cas à déterminer les causes de la défaillance et à proposer une méthode de réparation. En plus des risques pour le personnel et l'environnement, ces arrêts coûtent malheureusement chers à l'entreprise (coût de la maintenance et manque à gagner). L'inspection pendant la marche permet de réduire au minimum ces arrêts.

## **2.5 METHODES DE CONTROLE**

Un programme de suivi de la corrosion doit combiner plusieurs méthodes de contrôle, car une seule méthode ne peut pas générer l'ensemble des informations nécessaires à un diagnostic fiable de l'état de l'équipement ou du pipeline (piping). On distingue trois types de méthodes d'inspection et suivi de la corrosion, il s'agit : [15]

- Contrôle non destructif (CND).
- Contrôle destructif.

### **2.5.1 Contrôle non destructif**

Ils existent plusieurs méthodes de contrôles non destructifs, les plus utilisées dans l'industrie pétrolière sont :

- Inspection visuelle.
- Ultrason.



- Radiographie.
- Ressuage.
- Magnétoscopie.
- Micrographie (La réplique).
- L'essai de dureté.
- Courant Eddy.

### **2.5.2 Inspection visuelle**

Sans doute c'est la méthode la plus sûre et la plus fiable. L'accès direct à la surface interne de l'équipement permet de collecter des informations précieuses, ce qui permet de valider ou de corriger les informations obtenues par les autres méthodes de contrôle. L'accès direct est souvent rare, car il nécessite l'arrêt et l'ouverture de l'équipement. L'inspection visuelle s'effectue en deux étapes, la première étape avant le nettoyage de la surface interne de l'équipement et la seconde étape après le nettoyage.

- Première inspection :

L'objectif de cette première inspection est de vérifier les points suivants :

- Le volume des dépôts.
- La forme des dépôts.
- La couleur.
- Les propriétés des dépôts (friable, dur, poudre, visqueux .... etc.).
- La composition des dépôts.
- Les cratères de la corrosion.

- Deuxième inspection

On procède au contrôle de l'état de surface de l'équipement après nettoyage, le contrôle porte sur les points suivants :

- Contrôle après démontage des parties interne.
- Contrôle pour détecter s'il y a des dommages ou dommages dus à la corrosion
- Le contrôle s'il y a distorsion.
- L'entendu réel du problème.
- Types de défauts (nature et forme).

L'outillage nécessaire pour une inspection visuelle :

Une loupe, une lampe électrique, un marteau, endoscopes,... etc.

### 2.5.3 L'ultrason

#### a) Principe

Cette méthode est basée sur la réflexion des ondes ultrasonores, elle consiste à émettre depuis la surface de l'objet à contrôler, à l'aide d'un palpeur des impulsions ultrasonores, qui se réfléchissent sur un défaut pour estimer ses dimensions et sa profondeur. Cela se traduit sur l'appareil par un écho basé sur le temps d'émission et de réception des ondes ultrasonores.

#### b) Avantages et inconvénients

##### ➤ *Avantage :*

- L'équipement de contrôle est un outil compact et portable.
- Absence d'interruption des travaux pendant le contrôle.
- Disponibilité immédiate des résultats des essais.

##### ➤ *Inconvénients :*

- Nécessité de prendre un grand nombre de points de mesures.
- Difficulté à gérer un nombre important de mesures.
- Risque de passer des cratères de corrosion.
- Nécessite une préparation poussée de l'état de surface.

### 2.5.4 Radiographie

#### a) Principe

Elle est basée sur l'émission des rayons X ou des rayons qui y traversent un corps métallique et sont reçus sur un film sensible. Les défauts du métal apparaissent en sombre sur le film car l'intensité de radiation est affaiblie par ces défauts.

#### b) Avantages et inconvénients

##### ➤ *Avantage :*

- Permet de détecter la plupart des défauts (fissures, soufflures, inclusions, Porosités, manque de pénétration, manque de fusion. ...etc.).
- Ne nécessite pas une préparation de l'état de surface.
- Permet de détecter s'il y a présence de dépôts.

##### ➤ *Inconvénients :*

- Coût élevé.

- Nécessité de limiter un périmètre de sécurité.
- Difficile à manier.

### 2.5.5 Ressuage

#### a) Principe

Cette méthode consiste en l'application sur la surface du métal d'un liquide pénétrant à faible tension superficielle contenant des pigments visibles, ce liquide pénètre par capillarité dans toutes les fissures débouchant à la surface, après pénétration du liquide et nettoyage de la surface, on répand une poudre absorbante (révélateur) le plus souvent du talc, après quelques minutes le liquide retenu dans les fissures est absorbé par capillarité dans la poudre, c'est ainsi que les défauts sont mis en évidence [8].

#### b) Avantages et inconvénients :

##### ➤ Avantages

- Extrêmement simple à mettre en œuvre.
- Ne nécessite pas le démontage,
- Rapide.
- Peut être utilisé par un personnel peu qualifié,

##### ➤ Inconvénients

- Nécessité d'une préparation de l'état de surface.
- Détecter uniquement les défauts débouchant à la surface.
- Permet d'avoir uniquement une appréciation qualitative de la taille du défaut.

### 2.5.6 Magnétoscopie

#### a) Principe

Le procédé consiste à appliquer sur une surface faiblement magnétisée, un liquide contenant la poudre magnétique fluorescente, les défauts apparaissent brillants sur un fond sombre par la lumière de wood (lumière ultraviolet).

#### b) Avantages et Inconvénients

##### ➤ Avantage:

- Détecter la plus part des défauts de surface sur les cordons de soudure.
- Faciliter à mettre en œuvre.
- Résultats immédiats.

- Permet de détecter des défauts près de la surface (avantage par rapport au ressuage)
- Inconvénients :
  - Application limitée sur les métaux ferromagnétiques.
  - Nécessite une préparation de l'état de surface.

### **2.5.7 Essais micrographiques**

#### a) Principe

Cette méthode consiste à prélever la structure métallique de façon non destructive (par opposition à la prise d'échantillon d'une façon destructive, qui consiste à couper un échantillon pour pouvoir l'analyser ensuite au laboratoire). Pour cela, on utilise un film en cellulose, qui, en s'adhérant sur la surface métallique (soigneusement préparée) imprime (réplique) la structure métallique. Cet échantillon (film en cellulose) est ensuite analysé au laboratoire.

Les préparatifs nécessaires au prélèvement d'une structure sur un film cellulose sont les suivants :

- Préparation de la surface.
- Polissage.
- Attaque chimique qui permet de révéler les irrégularités à la surface.
- Impression par un film en cellulose.
- Observation microscopique du film.

### **2.5.8 Dureté**

#### a) Principe

Elle consiste à mesurer la résistance à la pénétration du matériau, en se basant sur la vitesse de répulsion de la bille (corps pénétrant) lancé avec une force produite par un ressort spécial. Dans ce cas, plus le matériau est dur, plus la vitesse de répulsion est grande.

#### b) Utilisation

L'essai de dureté est effectué pour mesurer le degré de dégradation des propriétés mécaniques, le plus souvent, il s'agit des zones affectées thermiquement lors de l'opération de soudage. Pour vérifier que la microstructure de ces zones n'a pas changé à cause de

réchauffement excessif (ce qui implique la dégradation des propriétés mécaniques), on effectue l'essai de dureté.

c) Moyens utilisés :

- Duromètre portatif électronique
- Duromètre portatif simple.

d) Avantages et Inconvénients:

➤ Avantage:

- Lecture digitale directe en HRC, HB, HV.
- Mémorisation des valeurs mesurées.

➤ Inconvénients:

- Indique une valeur inférieure à la dureté réelle pour les faibles épaisseurs.

### 2.5.9 Courant Eddy

a) Principe

Le balayage du palpeur sur la surface à contrôler par l'action d'un courant alternatif crée une induction magnétique qui se propagera dans la zone de test, la chute de tension indique la présence d'un défaut. La profondeur des défauts tels que piqûres ou autres peuvent être estimée par des amplitudes de signaux affichés.

b) Avantages et inconvénients :

➤ Avantage :

- Rapidité.
- Facilité d'automatisation de l'opération.
- Mémorisation des signaux.

➤ Inconvénients :

- Haute qualification et expérience pour l'interprétation des résultats.

### **2.5.10 Contrôle destructif (Essais destructifs)**

Les essais destructifs s'effectuent sur des échantillons dans des laboratoires ou des ateliers spécialisés, ils sont surtout utilisés pour pousser l'investigation dans les travaux d'expertise suite à des incidents. Ils ont pour but de vérifier les propriétés mécaniques et la microstructure des matériaux utilisés [8].

Les principaux essais utilisés sont :

- Les essais mécaniques.
- Les essais micrographiques.

Essais mécaniques :

- a) Essai de traction : permet de mesurer la limite élastique et la résistance à la rupture.
- b) Essai de résilience : permet de mesurer le risque de rupture fragile.
- c) Essai de fatigue : permet de déterminer la limite d'endurance.

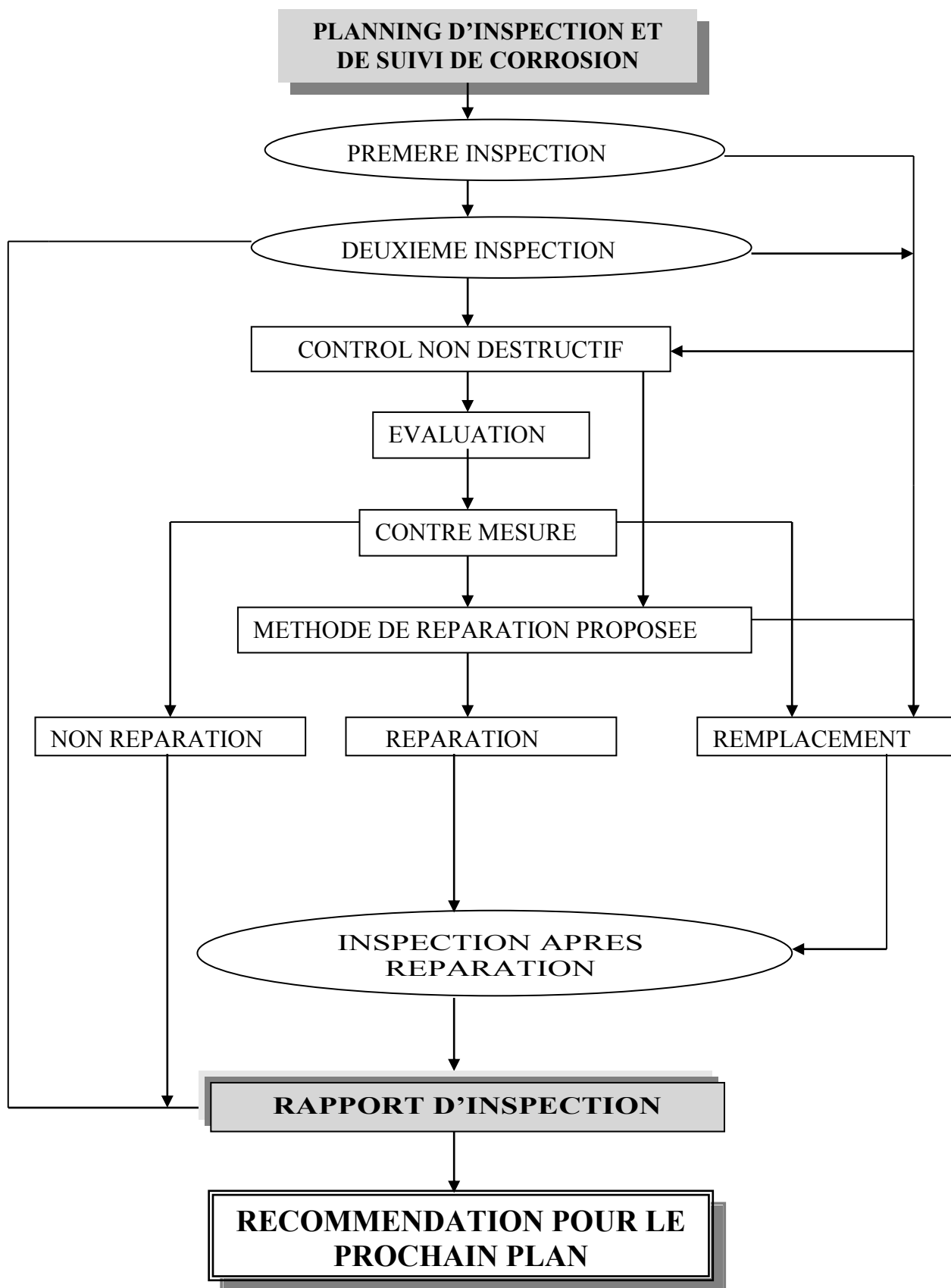
## **2.6 PLAN D'INSPECTION ET DE SUIVI DE LA CORROSION**

La pratique courante dans les entreprises de production des hydrocarbures dans le domaine de l'inspection et le suivi de la corrosion est basée essentiellement sur les arrêts programmés prévus par la réglementation. Les capacités (appareils à pression de gaz) sont ouvertes, inspectées visuellement, réparées s'il y a défauts, fermées et remises à l'exploitation. Des contrôles à l'ultrason sont parfois effectués à la demande de l'exploitation ou suite à des incidents.

La conception et la fonction d'un plan inspection et de suivi de la corrosion sont fondamentalement basées sur les contrôles imposés par la réglementation. Des contrôles non destructifs sont programmés et réalisés aussi à l'unité en service ou l'unité à l'arrêt. Ces contrôles génèrent des données qui permettent d'avoir une image claire et fiable de l'état des équipements statiques et pipeline, ceci permet :

- Eviter les arrêts non programmés.
- Planifier les travaux de réparation avant l'arrêt programmé.
- prolonger au maximum la durée d'exploitation de l'unité sans pour autant la mettre en danger.

Le plan d'inspection et suivie de corrosion concerne des équipements statiques et les pipelines de l'installation est présenté ci-dessous [12].



**Figure 2-1** : Organigramme technique d'inspection et de suivi permanent et régulier des installations [12].

## **2.7 CONCLUSION**

En résumé dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur les techniques et les méthodes de contrôle et d'estimations des dommages occasionnés dans les installations de productions des hydrocarbures, soit à travers les entretiens que nous avons eu avec les ingénieurs du domaine ou à travers une littérature étrangère.

Il est important de noter que l'étape d'évaluation des dommages corrosifs d'une partie des structures des installations de productions des hydrocarbures (pipeline) fait l'objet du chapitre 5 où une approche à travers un système expert est élaborée.



## **CHAPITRE 3**

### **GENERALITES SUR LA CORROSION**

### 3.1. ASPECTS THEORIQUES SUR LA CORROSION DES METAUX

L'étude de la corrosion constitue une branche de la chimie puisqu'elle correspond à des réactions qui font intervenir un métal et un réactif, mais pour résoudre les problèmes qu'elle pose, on ne peut pas se contenter d'appliquer les lois classiques de la chimie. En effet, de nombreux facteurs spécifiques, se rapportant au métal ou au réactif, peuvent avoir une grande influence sur la genèse et le développement des phénomènes de corrosion, si bien qu'il est indispensable pour les étudier de faire également appel aux lois de la métallurgie et de l'électrochimie.

La recherche sur la corrosion est ancienne puisque, dès 1830, les physiciens Auguste de la Rive en proposait une théorie électrochimique, cependant, ces recherches n'ont véritablement pris leur essor qu'au XX<sup>e</sup> siècle. leur but est double: déterminer le processus des phénomènes afin de leur trouver un remède, et définir les matériaux susceptibles d'être utilisés dans des conditions données pendant une durée qui est parfois de plusieurs décennies, comme c'est le cas pour certaines installations nucléaires. Les technologies avancées constituent également un bon exemple du rôle fondamental que joue la tenue des matériaux métalliques aux agents corrosifs. En effet, bien souvent, le développement d'une technique est freiné parce qu'il est difficile de trouver un métal ou un alliage qui résiste aux conditions d'emploi toujours plus difficiles qui sont exigées.

L'importance de la corrosion dépend de la nature du métal. Les métaux les plus électropositifs (magnésium, zinc, aluminium,...) ont une susceptibilité plus grande à la corrosion que les métaux qui le sont moins tels que (étain, cuivre, argent,...). Ce fait, qui repose sur des considérations thermodynamiques (potentiel redox), n'implique qu'une tendance à savoir que le comportement réel dépend aussi des facteurs cinétiques multiples. Pour cette raison la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque du métal : elle dépend plus de son environnement que de sa nature. L'environnement est, en effet, le facteur déterminant dans le développement de la corrosion.

Ce terme « environnement » est pris au sens large et inclut naturellement le milieu dans lequel baigne le métal, mais aussi les contraintes mécaniques résiduelles ou celles auxquelles il est soumis pendant son utilisation [16].

Parmi les facteurs jouant un rôle important, on peut citer:

- Atmosphère sèche ou humide,
- Température normale ou élevée,
- Eau douce ou salée,

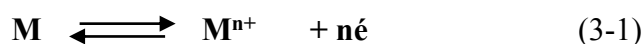
- Nature et degré d'humidité du sol,
- Présence de micro-organismes, etc.,

La tension, la fatigue, la vibration, le frottement, l'érosion, la cavitation, le choc, etc., sont quelques unes des contraintes mécaniques possibles. Selon l'environnement, on observe deux types principaux de corrosion: la corrosion sèche et la corrosion humide ou aqueuse [17].

### 3.2. DEFINITION

Le terme corrosion est défini par l'ensemble des interactions physico-chimiques entre un métal et son milieu environnant, entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent sa dégradation fonctionnelle de son environnement. Les interactions sont toujours de nature électrochimique.

La corrosion d'un métal correspond aussi à sa dissolution anodique selon la réaction :



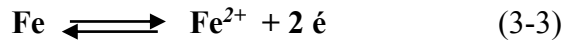
Couplée à une ou plusieurs réactions cathodiques schématisées par :



L'interprétation de la corrosion électrochimique, quelle qu'en soit l'origine, fait intervenir l'existence simultanée d'une réaction d'oxydation du métal sur les micros anodes et d'une réaction de réduction de l'hydrogène ou de l'oxygène aux cathodes. L'intensité des courants qui correspondent à ces deux réactions est identique en valeur absolue, mais, en fait, c'est le courant relatif à la réaction anodique qui est le seul responsable du phénomène de corrosion.

### 3.3. PROCESSUS DE CORROSION

Dans la plupart des cas, le processus de corrosion est du type électrochimique. L'origine de ce processus est une hétérogénéité qui existe soit dans le métal (des inclusions), soit dans le milieu (agents oxydants : protons, oxygène...), un transfert de charge à l'interface entre un conducteur électronique « l'électrode » et un conducteur ionique « l'électrolyte », engendre la formation d'une pile : un courant électrique circule entre l'anode et la cathode. Considérant le cas de la dissolution du fer en milieu aqueux :

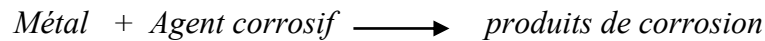


En présence d'oxygène, dans l'eau de mer et en milieu neutre ou basique, l'oxydation du fer est couplée avec la réduction de l'oxygène pour former des ions hydroxydes, on parlera dans ce cas de corrosion par oxygène. En milieu acide avec la réaction de décharge du proton, on parlera de corrosion acide. D'autres oxydants peuvent corroder les métaux, c'est le cas de cations métalliques ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Sn}^{4+}$ ), d'anions oxydants ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{MnO}_4^-$ ), et de gaz dissous ( $\text{O}_3$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ).

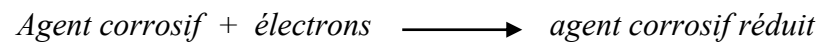
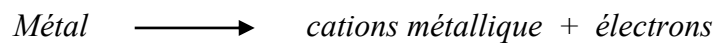
Les conduites enterrées, notamment dans les zones humides sont touchés par la corrosion biologique (attaque bactérienne). Ces bactéries n'attaquent pas le fer à Tétât métallique (attaque indirecte). Leurs réactions se distinguent par la formation de dépôts adhérents au métal, par libération d'agents chimiques agressifs ou mêmes par activation anodique [16].

### 3.4. CORROSION ELECTROCHIMIQUE

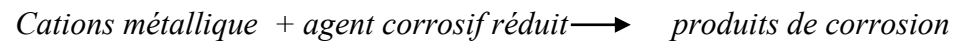
Dans les conditions qui règnent à l'intérieur des équipements qui véhiculent la production des puits de pétrole ou de gaz naturel, la corrosion ne peut avoir lieu que par un processus **électrochimique**. Ceci signifie qu'elle n'est pas le fait d'une réaction chimique directe du type.



Mais plutôt d'une réaction globale représentant ta combinaison de deux réactions électrochimique (c'est à dire mettant enjeu des électrons).



et de la réaction chimique :

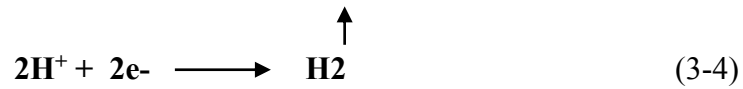


Ces réactions sont souvent très complexes.

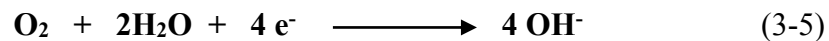
On sait, en effet, qu'un métal a une structure particulière constituée d'un réseau tridimensionnel de calions métalliques entouré d'un nuage électronique: c'est ce type de liaison chimique, dite «liaison métallique», qui est responsable des propriétés caractéristiques des métaux, comme la conductibilité électrique. Quand un métal est mis au contact d'un milieu conducteur ionique; c'est à dire d'un électrolyte; les cations du réseau

ont tendance à passer dans celui-ci en libérant la même charge électrique du nuage électronique selon la réaction (3-1) voir ci—dessus.

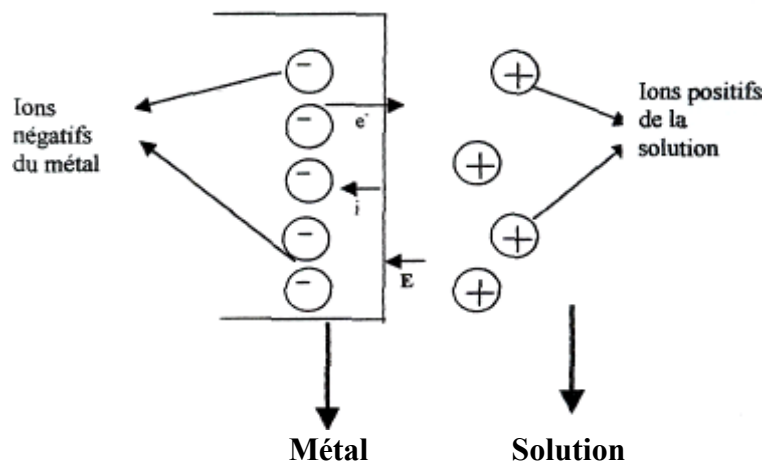
Dans le cas où ces électrons peuvent être consommés en d'autres endroits de la surface du métal, cette réaction d'oxydation, qui conduit à la désagrégation de la surface métallique, c'est à dire à la corrosion, peut se poursuivre dans le temps. On a alors formation de piles entre des zones anodiques où la réaction d'oxydation du métal a lieu, et des zones cathodiques où une ou plusieurs réactions de réduction du milieu se produisent. Dans le cas qui nous préoccupe, il y a deux types de réactions de réduction qui peuvent se produire: en l'absence d'oxygène dissous la seule réduction possible est celle des protons qui s'accompagne de dégagement d'hydrogène :



En présence d'oxygène, il y a réduction avec alcalinisation correspondante du milieu :



Quand une telle pile de corrosion se forme, c'est à dire que le métal se dissout par endroits alors que certaines espèces chimiques contenues dans l'électrolyte, et dite «**agents corrosifs**», se réduisent ailleurs, le courant électrique circule par transfert d'électrons à l'intérieur du métal de l'anode vers la cathode (conduction électronique) et par transfert d'ions à l'intérieur de l'électrolyte (conduction ionique), les cations allant vers la cathode et les anions vers l'anode.



**Figure 3-1** : Schéma représentant le contact à l'interface métal / électrolyte [17].

### **3.5. LES ASPECTS DE CORROSION**

Une classification des principales manifestations visibles de la corrosion, dont certains sont plus ou moins reliées entre elles. On décrit ci-dessous les grands traits des principales formes de corrosion voir figure 3-2 [15].

#### **3.5.1 Corrosion généralisée**

La corrosion généralisée est l'usure de toute la surface exposée, le métal devient plus mince et se perce éventuellement, cette corrosion peut être uniforme ou galvanique, tout en faisant intervenir un métal ou plusieurs métaux. La corrosion généralisée est la forme la plus répandue car elle freine la durée de vie des installations.

#### **3.5.2 Corrosion localisée**

On groupe sous ce terme des formes de corrosion dans laquelle les pertes de métal n'affectent que certaines zones spécifiques du matériau ; elles affectent surtout les matériaux passivables et peuvent être particulièrement dangereuses car :

- certains types de corrosion localisée peuvent se produire dans des milieux en apparence peu agressifs.
- De très faibles pertes de métal peuvent entraîner la ruine complète des structures importantes.
- Elles sont souvent très difficiles à détecter avant que les dommages ne soient devenus graves et une évaluation quantitative des dommages est en général difficile.
- Quand elle est possible, la détection sur des appareils en service est coûteuse car elle fait appel soit à des examens visuels détaillés, soit à des techniques de contrôle non destructif tel que les ultrasons, ou des techniques radiographiques. De plus, si l'on veut limiter les coûts de contrôles il est nécessaire de savoir prévoir les zones les plus probables d'apparition des dommages.

#### **3.5.3 Corrosion par piqûres**

Les piqûres constituent une forme d'attaque extrêmement localisée et peuvent aboutir au percement du métal- La zone anodique se limitant à un point, nous avons une corrosion qui

s'y installe et entraîne une profonde pénétration. Ces piqûres sont difficiles à déceler à cause de la dimension réduite et parce que, très souvent elles sont recouvertes de produits de corrosion. De plus, il est difficile de les mesurer quantitativement en raison des profondeurs variées et de leur nombre. Ce type de corrosion comprend au moins deux étapes : [18]

- i) l'amorçage, qui correspond aux temps nécessaires pour aboutir à un défaut mesurable de destruction (attribué aux halogénures en général, aux chlorures en particulier),
- ii) la propagation : qui correspond à la croissance en largeur et en profondeur de la zone attaquée.

#### **3.5.4 Corrosion intergranulaire**

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Le cas le plus classique concerne les aciers inoxydables et plus généralement les alliages Fer-Chrome-Nickel, ce type de corrosion est particulièrement dangereux car il s'agit d'un phénomène microscopique.

#### **3.5.5 Corrosion galvanique**

L'appellation «corrosion galvanique» prête à confusion puisque toute corrosion électrochimique est galvanique. Elle introduit les notions de l'anode et de cathodes et la différence de potentiel entre chacune d'elle ainsi que le courant de corrosion. L'appellation corrosion galvanique, fait intervenir des métaux différents, contrairement à la corrosion uniforme, qui peut être attribuable aux modifications du milieu ou à celles de la surface d'un même métal. En effet, quand deux métaux différents sont reliés entre eux dans un électrolyte, il s'établit une différence de potentiel et un débit de courant.

La corrosion est habituellement accentuée sur le métal le plus électronégatif (le moins noble) et s'arrête sur le plus électropositif (le plus noble). Le métal le moins résistant devient anodique et le plus résistant cathodique. Il s'agit d'une corrosion électrochimique, mais par souci de clarté, nous conservant le terme « galvanique » pour le qualifier.

### **3.5.6 Corrosion fissurante sous tensions**

Elle est provoquée par l'effet combiné de tensions mécaniques statiques à l'intérieur du métal et d'une attaque du milieu (généralement peut prononcée). C'est les cas de la fragilisation par hydrogène de certains aciers en présence de H<sub>2</sub>S, ou de la fissuration des aciers inoxydables austénitiques par l'ion Chlorure [17].

### **3.5.7 Corrosion par usure mécanique**

L'action combinée de l'usure mécanique (qui dépassive le métal), et de la corrosion qui reforme les films d'oxyde sur la surface du métal, provoque une attaque selon l'un des deux processus suivants :

#### **a- Erosion**

Sous l'influence de la circulation d'un liquide, surtout s'il véhicule des particules solides, la surface du métal attaqué présente des cannelures ou cratères notamment dans les canalisations, plus particulièrement au niveau des coudes et des tés. C'est le résultat de la corrosion érosive.

#### **b- Cavitation**

Sous l'effet de la cavitation, le film passif est détruit localement, il se reforme et sous le même effet est à nouveau détruit. Ce type de corrosion s'observe notamment sur les hélices des navires et des turbines.

### **3.5.8 Corrosion sélective**

Elle peut se produire avec les alliages formés de métaux dont la sensibilité à la corrosion est très différente. Le métal le plus électropositif étant corrodé, exemple la dézincification des laitons, où le zinc se corrode.

### **3.5.9 Corrosion par crevasses**

Elle se manifeste souvent dans les cavités et recoins des structures métalliques, qui retiennent et accumulent de l'eau rendue conductrice par le dépôt de sels. La meilleure lutte contre cette forme de corrosion consiste à éliminer les interstices de construction.

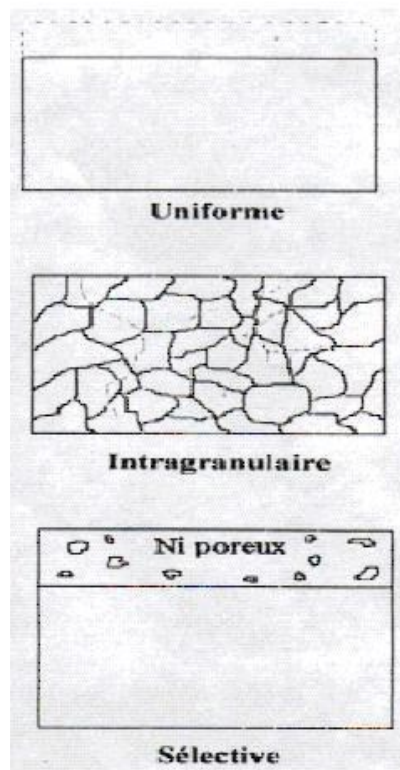


### **3.5.10 Corrosion biochimique**

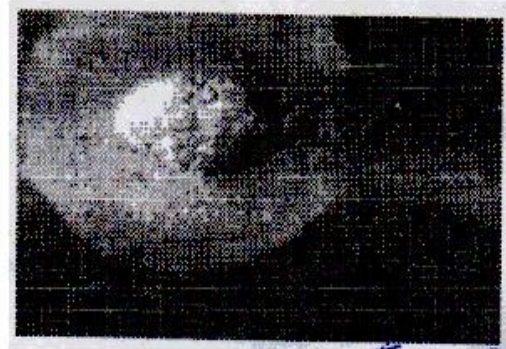
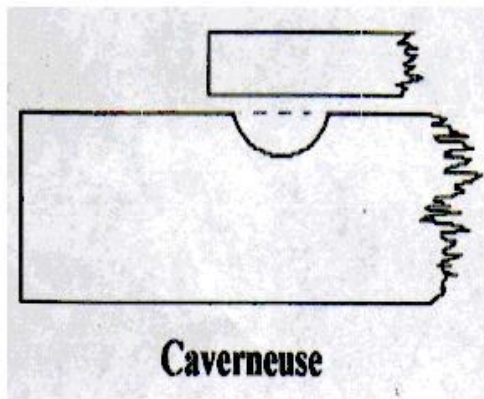
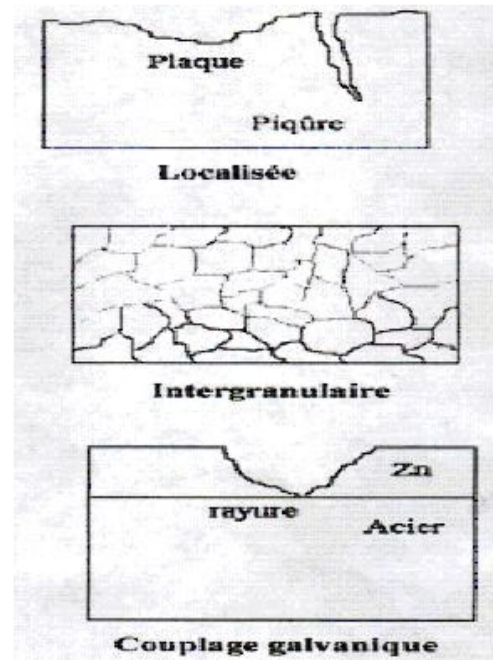
La corrosion biochimique peut être définie comme un phénomène dans lequel les bactéries jouent un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi soit en créant un terrain favorable à son établissement

En effet, on peut considérer que les bactéries ne jouent qu'un rôle d'accélérateur de la corrosion électrochimique, en empêchant la polarisation de se produire par :

- Fixation de l'hydrogène cathodique (bactéries sulfato- réductrices).
- Transformation de sels ferreux en hydroxydes ferriques (ferro-bactéries).



(G : x10)



avec apparition d'une auréole de corrosion.

Figure 3-2 Représentation schématique des différentes formes de corrosion [17].

### 3.6. LES FACTEURS DE LA CORROSION

Les facteurs susceptibles d’agir sur la corrosion humide où sèche des métaux et alliages sont nombreux. Le tableau suivant regroupe les principaux.

**Tableau 3-1 : Facteurs de corrosion [18]**

<b>Facteurs définissant les modes d’attaque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentration de réactif.</li> <li>-Teneur en oxygène, en impuretés.</li> <li>-Acidité (pH) du milieu.</li> <li>-Température, pression.</li> </ul>
<b>Facteurs métallurgiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Composition de l’alliage.</li> <li>-Impuretés.</li> <li>-Traitements thermiques, mécaniques.</li> <li>-Additions protectrices.</li> </ul>
<b>Facteurs définissant les conditions d’emploi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Etat de surface.</li> <li>-Forme des pièces.</li> <li>-Sollicitations mécaniques.</li> <li>-Emploi d’inhibiteurs.</li> <li>-Procédés d’assemblage.</li> </ul>
<b>Facteurs dépendant du temps</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vieillessement.</li> <li>-Tensions mécaniques.</li> <li>-Température.</li> <li>-Modification des revêtements protecteurs</li> </ul>

### **3.7. INFLUENCE DES PRINCIPAUX PARAMETRE PHYSICO-CHIMIQUES SUR LA VITESSE DE CORROSION**

La corrosion à l'origine se manifeste à la surface du métal, il est logique que les caractéristiques de cette surface jouent un rôle important sur le comportement du métal à l'égard de la corrosion. Les caractéristiques de ce que l'on appelle l'état de surface peuvent être de nature cristallographique, chimique et physico - chimique [17].

#### **3.7.1 Caractéristiques cristallographiques**

Les caractéristiques cristallographiques dépendent du type de la structure, de la dimension des grains et du degré de perfection du réseau cristallin en relation avec le mode d'élaboration du métal ou de l'alliage et avec ses conditions d'emploi. En ce qui concerne la structure, les atomes situés à la surface possèdent un nombre de voisins inférieur à ceux situés dans la masse du métal [15].

#### **3.7.2 Caractéristiques chimiques**

##### **a) Effet de la composition chimique**

De multiples analyses de corrélation sont effectuées sur les matériaux et ont des résultats qui permettent de prédire la susceptibilité des aciers à la corrosion en fonction de leur teneur en éléments d'alliages. Le taux de carbone, par exemple, contenu dans les aciers exerce un effet majeur par rapport aux autres éléments. Dans un milieu alcalin, la vitesse de corrosion augmente linéairement avec la teneur en carbone, En revanche, cet effet devient mineur dans un milieu acide concentré.

##### **b) Effet du pH**

Dans le cas du fer ou de l'acier au carbone, la vitesse de corrosion dépend du pH. Pour de faibles valeurs en pH, le mécanisme de corrosion dépend non seulement du pH mais aussi des ions présents en solution. Dans une solution d'acide sulfurique ( $0 < \text{pH} < 4$ ), la vitesse de corrosion peut être limitée par la diffusion des ions de sulfates  $[\text{SO}_4]^{2-}$  et par la saturation en sulfate de fer  $[\text{FeSO}_4]$ . En revanche, dans une solution d'acide chlorhydrique, elle est rapide.

Dans le domaine  $5 < \text{pH} < 9$ , alors que les oxydes et les hydroxydes sont dissous à  $\text{pH} < 5$ , ils forment des couches à la surface pour des  $\text{pH} > 5$ . La cinétique de corrosion devient

indépendante du pH. Elle est alors contrôlée par la réaction de réduction de l'oxygène dissous. La formation de certains composés tels que la magnétite  $Fe_3O_4$  passive le fer. Pour les milieux basiques ( $pH > 9$ ) et dans certains cas, l'augmentation du pH provoque le phénomène de corrosion inexistant à de faibles valeurs de pH. Ce phénomène touche d'une façon générale les métaux et leurs alliages. La corrosion du fer se manifeste d'une manière uniforme à des pH élevés. Elle est causée par la solubilité de  $Fe(OH)_3^-$  et  $Fe(OH)_4^-$  ce qui entraîne une corrosion thermodynamiquement plus stable [17].

### c) Effet de la température

La vitesse de corrosion augmente exponentiellement avec la température, selon la formule d'Arrhenius exprimant la vitesse de réaction en fonction de la température [18].

$$V_{\text{corr}} = A \cdot \exp(-E_a / RT) \quad (3-6)$$

$V_{\text{corr}}$  : vitesse de corrosion (mm/an)

$A$  : facteur de fréquence (1/mole.s)

$E$  : énergie d'activation (cal/mole)

$R$  : constante des gaz parfait (l.atm.mole<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$T$  : température (K)

Pour des pH très élevés et à haute température, l'acier au carbone peut subir une corrosion fissurante, c'est le cas notamment d'une solution très concentrée en NaOH.

### d) Le pouvoir oxydant du milieu

La corrosion étant très généralement due à une oxydation, le pouvoir oxydant des milieux est un paramètre fondamental pour les phénomènes de corrosion. Il est fréquent que toutes choses égales par ailleurs, l'agressivité d'un milieu augmente avec l'accroissement de son pouvoir oxydant, mais il arrive aussi qu'un certain pouvoir oxydant soit nécessaires à la formation de films d'oxydes protecteurs.

L'oxydant le plus répandu est naturellement est l'oxygène de l'atmosphère dissous dans le milieu; mais l'eau est elle même un oxydant suffisamment puissant pour oxyder certains matériaux comme le fer, le chrome, l'aluminium, le titane, le zinc, etc. Il existe également d'autres oxydants que l'on rencontre assez fréquemment dans des milieux corrosifs, tels que les nitrates, les chromates, les chlorates...

### 3.7.3 Passivation :

Certains métaux et alliages ont la propriété de se passiver .En contact avec un milieu agressif, ils subissent une première attaque corrosive qui forme des produits de corrosion suffisamment insolubles, adhérents et compacts (oxydes) pour isoler le métal comme par un revêtement c'est la couche de passivation .La corrosion se ralentit considérablement après cette première attaque et seul un courant très faible se manifeste c'est le courant de passivation .

#### Etude de courbe intensité – potentiel d'un métal passivable :

Le phénomène de passivation peut être observé en traçant la courbe intensité potentiel d'un métal passivable. Ainsi, la figure 2-3 ci-dessous illustre le comportement d'un métal M plongé dans une solution conductrice dans laquelle toutes les espèces susceptibles de s'oxyder ou de se réduire dans le domaine de potentiel exploré sont supposées absentes afin de n'obtenir que la composante anodique relative à la seule oxydation du métal. Dans la courbe intensité–potentiel réduite à sa composante anodique d'un métal. On distingue sur la courbe plusieurs domaines séparés par trois potentiels remarquables :

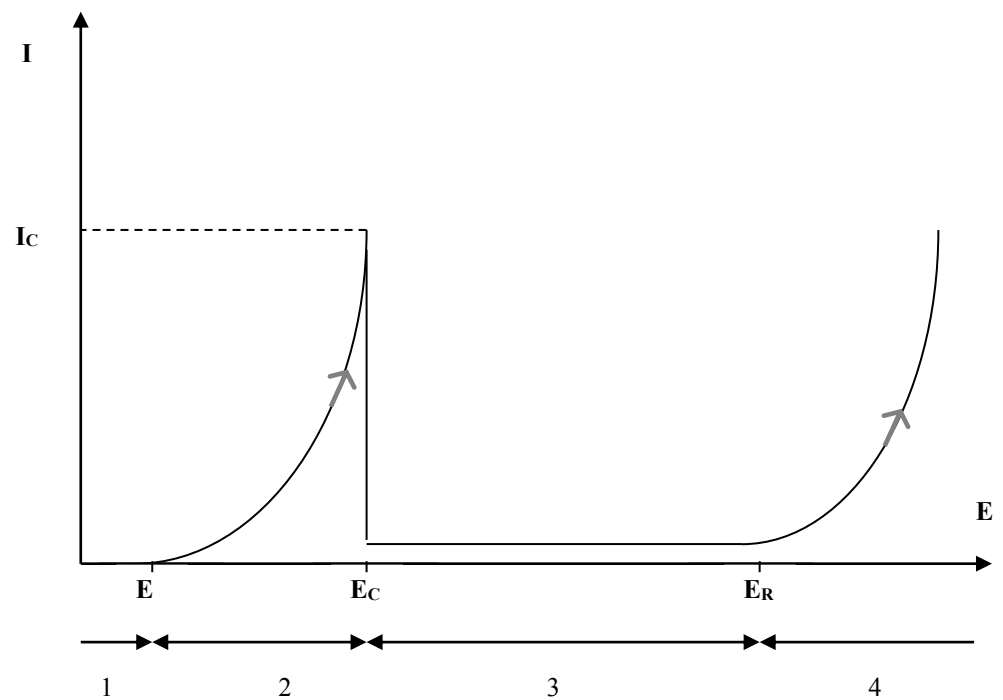
- le potentiel d'équilibre du métal  $E_M$  .
- le potentiel critique de passivation  $E_{CP}$ , est le potentiel au dessus duquel, la vitesse de corrosion devient très faible, le courant diminuant brutalement à partir d'une valeur appelée « courant critique de passivation ».
- le potentiel de rupture  $E_{RP}$ , est le potentiel à partir duquel, la couche de passivation se désagrège et perd ses qualités de recouvrement le métal se corrode à nouveau.

Ces domaines sont :

- 1- domaine d'immunité.
- 2- domaine d'activité.
- 3- domaine de passivité.
- 4- domaine de transpassivité.

Dans le domaine d'immunité correspondant au cas où le potentiel appliqué est inférieur au potentiel d'équilibre du métal  $E < E_M$  le métal est cathodique, il est donc immunisé .Dans le cas où la solution contiendrait une espèce réductible dans se domaine de potentiel, le métal jouerait le rôle de cathode sur laquelle cette espèce se réduirait.

Dans le domaine d'activité, pour  $E_M < E < E_{CP}$ , le métal se corrodé d'autant plus rapidement que le potentiel augmente et cela jusqu'à la valeur limite du courant critique de passivation. Entre le potentiel de passivation et le potentiel de rupture,  $E_{CP} < E < E_{RP}$ , dans le domaine de passivité la corrosion est insignifiante. Le faible courant qui se manifeste correspond à la régénération continue et lente de la mince couche de passivation (quelques nanomètre). Au-delà du potentiel de rupture, s'étend le domaine de transpassivité dans lequel le métal redevient actif.



**Figure 3-3** : Courbe intensité-potentiel réduite à sa composante anodique d'un métal passivable [15].

### 3.8 PROTECTION CONTRE LA CORROSION

La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de planification. En d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation. Il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet pour un coût minimal, comprenant tout les frais d'investissement que d'entretien. En plus, la solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement naturel et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation (comme c'est le cas dans les domaines de l'aviation,

centrales nucléaires, réacteurs chimiques etc...). La minimalisation des risques d'accident prime sur toute autre considération.

La lutte contre la corrosion englobe les méthodes de préventions suivantes : [8]

### **3.8.1 Forme adaptée des pièces**

- il faut éviter les zones humides, dans certains cas une aération suffisante permet d'éviter les endroits humides.
- Il faut éviter la concentration des contraintes trop élevées en jouant sur la géométrie des pièces.
- Eviter les changements brusques de direction des fluides pour éviter le risque de corrosion- érosion.
- Eviter la formation des piles d'aération dans des endroits inaccessible comme les fonts pour éviter la corrosion caverneuse)
- Eviter le contact entre métaux différents pour éviter la corrosion galvanique

### **3.8.2 Le choix des matériaux**

Il faut sélectionner les matériaux par rapport à leurs résistances à la corrosion a travers des sources de renseignements [15].

- les connaissances générales des mécanismes de corrosion.
- L'expérience antérieure avec des équipements similaires
- Les normes
- Les indications des fournisseurs
- La littérature technique et scientifique
- Les banques de données les essais en laboratoires.

### **3.8.3 Protection par un revêtement**

Le revêtement est généralement constitué par un ensemble de matériaux isolants. Pour assurer correctement son rôle dans le temps, un revêtement doit posséder les qualités suivantes : [19]

- avoir une excellente adhérence avec le métal support.
- Etre suffisamment étanche, continu et homogène, pour ne pas être imprégné par le milieu électrolytique environnant.
- Présenter une grande inertie.
  - o Aux agents biologiques ou chimiques continues dans le sol et l'eau



- Aux produits transportés (en cas de fuites accident elles).
- Présenter une bonne résistance aux contraintes mécaniques et thermiques provoquées par les mouvements relatifs du sol et de la conduite sous l'action des fluides transportés si toutes ces exigences sont satisfaites, le revêtement pourra sans grand affaiblissement garder dans le temps ses caractéristiques mécaniques et électriques initiales

**a. Revêtements métalliques**

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique aussi sur d'autres substrats comme le cuivre et le laiton, à l'instar des revêtements de chrome sur les robinets d'eau ou les revêtements d'or sur les contacts électriques des circuits imprimés les revêtements métalliques, outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative, on les utilise aussi comme protection contre l'usure. [19]

**b. Revêtements organiques**

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu. Certaines peintures constituent en plus un réservoir d'inhibiteurs de corrosion, on classe les revêtements organiques pour la protection des métaux contre la corrosion en trois familles : [20]

- les revêtements en bitume
- les revêtements polymériques
- les peintures et vernis

**3.8.4 Protection par inhibiteur**

Conformément à la définition donnée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE) "un inhibiteur c'est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration" [21].

La diminution de la vitesse de corrosion est réalisée soit en limitant les réactions chimiques ou électrochimiques (c'est-à-dire agissant sur le processus anodique, le processus cathodique ou les deux) soit en modifiant l'agressivité de l'électrolyte, en fait en modifiant l'interface matériau/milieu [19].

Les inhibiteurs de corrosion sont des corps chimiques qui, ajoutés en petite quantité dans le milieu corrosif diminuent la corrosion. Les inhibiteurs sont utilisés dans les ateliers de décapage, dans l'industrie mécanique et électronique (inhibiteurs volatils), industrie de pétrole (les canalisations, l'industrie alimentaire.....).

De point de vue électrochimique, les inhibiteurs forment trois groupes : cathodiques (a) anodique (b) et mixte (c) voir figure 3-4.

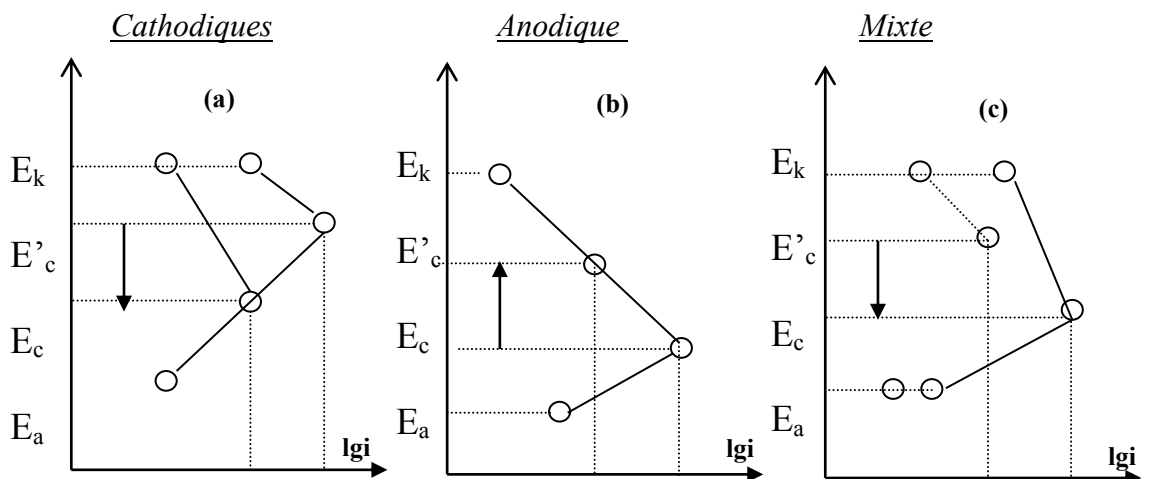


Figure 3-4 : Groupes d'Inhibiteurs [18]

La plus part des inhibiteurs, influe sur les réactions cathodiques et les réactions anodiques en même temps, en particuliers, ce sont les inhibiteurs organiques.

Lorsqu'on parle d'inhibiteur, il faut préciser le métal et le milieu corrosif, car il n'existe pas d'inhibiteurs universel, autrement dit quelques les corps organiques peuvent être des inhibiteurs pour un métal et stimulants pour un autre même dans un même milieu corrosif. Par exemple : les nitrites protègent bien le **Fe** dans un milieu neutre mais accélèrent sa corrosion dans un milieu très acide.

Pour les constructions métalliques faites de plusieurs nuances de métal, on utilise souvent un mélange d'inhibiteurs. L'utilisation d'inhibiteurs exige la connaissance de mécanisme de la corrosion et des conditions permettant une protection efficace [20].

### 3.8.4.1 Efficacité d'un inhibiteur corrosion :

Les expressions les plus couramment utilisées pour exprimer l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion sont les suivantes: [18]

- le **taux d'inhibition**, le plus souvent utilisé :

$$\tau \% = \frac{u_0 - u}{u_0} \times 100 \quad (7)$$

- le **coefficient d'inhibition** :

$$\gamma = \frac{u_0}{u} \quad (8)$$

Où  $u_0$  représente la mesure de corrosion (perte de masse, intensité de corrosion) en absence d'inhibiteur et  $u$  représente la mesure de corrosion en présence d'inhibiteur.

L'efficacité d'inhibiteur dépend de :

#### a. la concentration :

Une bonne protection est assurée uniquement à partir d'une certaine quantité, généralement l'efficacité augmente avec la concentration pour se stabiliser après, mais il y a des cas où l'efficacité augmente passe par un maximum et chute après [19].

#### b. l'acidité du milieu :

La majorité des inhibiteurs sont efficaces seulement à des PH déterminés. Ceci est lié à la stabilité et la résistance des couches protectrices et des inhibiteurs de corrosion. Les inhibiteurs qui forment des couches protectrices peuvent protéger le métal seulement dans des milieux où ils peuvent former des dépôts, le milieu corrosif doit être neutre, la stabilité dépend aussi du pH [18].

Une action efficace d'inhibiteur dans les milieux acides est assurée généralement par des corps inorganiques contenant soit des cations ( $Ca^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Bi^{2+}$ ,  $Sb^{2+}$  ..) soit des ions ( $CrO_4^{2-}$ ,  $CrO_7^{2-}$ ,  $NO_2^-$ ,  $SiO_3^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$  ..) qui sont à l'origine de l'inhibition de la corrosion, plusieurs facteurs peuvent déterminer le mécanisme de leur action parmi lesquel on peut citer :

- la possibilité de l'inhibiteur de prendre part à la réaction électrochimique.
- Ses propriétés oxydo - réduction.
- Solubilité

- La structure des produits formés pendant le processus d'inhibition.

### **3.8.5 Protection électrochimique**

On peut protéger un métal contre la corrosion en lui imposant un potentiel qui satisfait l'un ou l'autre des critères suivants :

- être égal ou inférieur au potentiel de protection.
- être correspondant au domaine passif.

Le premier critère c'est la protection cathodique, le deuxième est celui de la protection par passivation.

Le domaine de passivité stable (domaine passif) s'étend du potentiel de passivation  $E_p$  au potentiel de transpassivation (potentiel de piqûre)  $E_b$  (voir figure 2-3).

Dans cette intervalle de potentiels la vitesse de dissolution des métaux est très faible, pourvu que le milieu ne soit pas trop agressif.

#### **3.8.5.1 La protection cathodique**

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour la vitesse de corrosion devient négligeable. En pratique, cette méthode sert surtout à protéger les structures lourdes en acier, telles que les plates-formes de forage pétrolières en mer, les bateaux, les installations chimiques et les conduites enterrées [20].

Deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique: le potentiel de protection et la densité de courant de protection.

#### **Méthodes de protection**

- **Protection par anode réactive** : [17]

La protection cathodique par anode réactive a pour but de créer une pile avec deux métaux différents. Dans ce type de protection l'anode se consomme par dissolution et permet de porter la surface à protéger au potentiel de non corrosion de l'acier.

Pour que cette protection existe il faut :

- Que la pile débite.
- Que la surface à protéger et l'anode soient plongées tous les deux dans le même milieu corrosif.

➤ **Protection par soutirage de courant** [20].

Ce mot vient du système de protection qui consiste à « soutirer » de la structure à protéger, par l'intermédiaire d'une source électrique, la quantité de courant nécessaire pour porter la masse métallique à un potentiel suffisamment négatif. Le pôle négatif de la source est relié à la conduite, le pôle positif à l'anode déversoir.

Le soutirage comprend essentiellement :

- Une source de courant continu.
- Une anode déversoir.
- Des câbles de liaisons entre appareil et anode et entre appareil et structure à protéger.
- Des appareils de mesures du fonctionnement du soutirage.

➤ **Protection par drainage des courants vagabonds** [22].

La protection par drainage consiste à diriger les courants vagabonds, émis par les réseaux de voies ferrées par exemple, et à les ramener à leurs sources. On évite ainsi la sortie des courants de la structure vers le sol.

### **3.8.5.2 La protection anodique**

La protection anodique s'applique aux métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif  $E_{\text{corr}} < E_p$ . Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif [22].

## **CHAPITRE 4**

### **NOTIONS GENERALES SUR LES SYSTEMES EXPERTS**

## 4.1 INTRODUCTION

Depuis quelques années, les recherches en intelligences artificielles visent à créer des machines logiques ou des logiciels ayant des comportements "intelligents". Un domaine d'application de l'intelligence artificielle est celui des systèmes experts. Véritable révolution dans la technique de construction et l'utilisation de logiciels informatiques, les systèmes experts sont pressentis pour être, dans les années à venir, l'outil d'aide à la décision par excellence. Rappelons que les systèmes experts sont des programmes informatiques qui permettent de résoudre des problèmes dans un domaine pour lequel il existe des experts humains. Ces systèmes tentent de reproduire d'une certaine manière le raisonnement de ceux-ci. Ils peuvent aussi avoir pour but de préserver et de distribuer une connaissance, une expertise, un savoir-faire, une expérience. Ils constituent également un outil pédagogique. La réalisation de systèmes experts nécessite l'utilisation de générateurs de systèmes experts. Ces logiciels permettent à des "experts", non obligatoirement spécialistes en informatique, de développer un système sans avoir à programmer la syntaxe de base permettant de créer les composants logiciels du système, moteur d'inférences, interface utilisateur, interface d'acquisition des connaissances

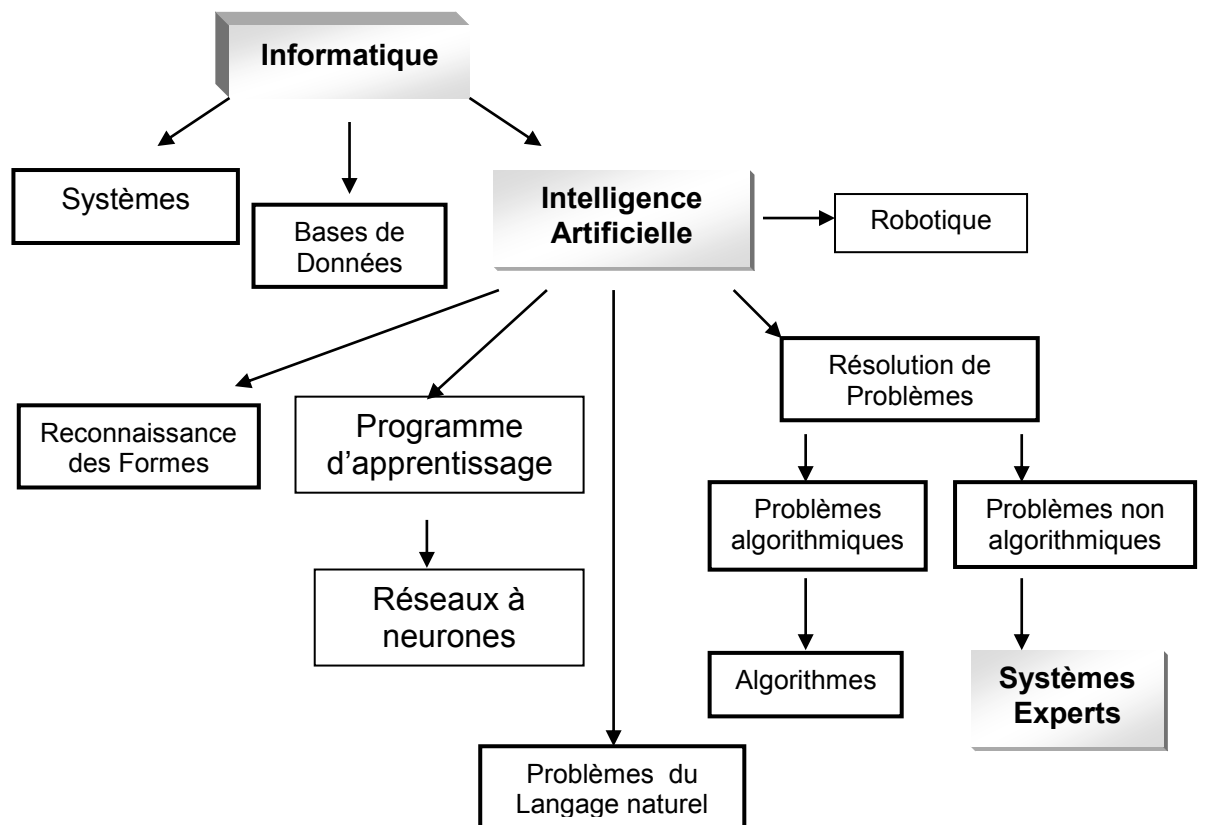
Les systèmes experts sont donc une application de l'intelligence artificielle qui aborde les problèmes pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme général de résolution et où la connaissance est largement fragmentée et les techniques de résolution fortement liées au savoir-faire de l'expert humain [23].

## 4.2 DOMAINES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les domaines de l'intelligence artificielle sont représentés dans la figure 4.1. Ces domaines incluent :

- La compréhension d'image ou la reconnaissance de forme
- La compréhension des langues naturelles ou traitement du langage naturel
- Résolution de problèmes
- Les programmes d'apprentissage
- Réseaux à neurones
- Robotique

Dans ce qui suit et dans le cadre de notre mémoire on s'intéressera au domaine de la compréhension, la représentation et la résolution des problèmes : C'est le domaine des systèmes experts.



**Fig. 4-1** : Branches de l'informatique [24].

### 4.3 DEFINITION D'UN SYSTEME EXPERT

Un système expert est un programme informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un ou (plusieurs) spécialistes de ce problème [25].

Un système expert est construit à partir de l'analyse d'un savoir. Il va donc,

- Contenir des connaissances sur un système donné.
- Percevoir une réalité à mettre en regard de ces données.
- Mettre en œuvre un raisonnement utilisant ces connaissances destinées à conduire à la solution du problème posé.



#### **4-3-1 Rôle des systèmes experts**

Les SE sont des systèmes de consultation de type interactif qui ont pour but d'aider les spécialistes à raisonner sur des problèmes complexes dans leur domaine d'expertise. Ils sont développés comme une technique informatique visant à atteindre les trois objectifs suivants [26] :

- capturer aisément les unités de savoir faire, c'est à dire faciliter l'expression des règles, par rapport à leur forme d'émergence chez les experts
- exploiter l'ensemble des unités de savoir faire c'est à dire combiner les groupes de règles (chaîner) pour inférer (soit dériver) des connaissances telles que jugement, décision, ou autres, et donner la possibilité d'expliquer le processus de raisonnement (capacité d'explication)
- supporter aisément la révision de l'ensemble des unités de savoir faire c'est à dire offrir des facilités pour les ajouts et les suppressions de règles (maintenance).

#### **4-3-2 Domaine d'application des systèmes experts**

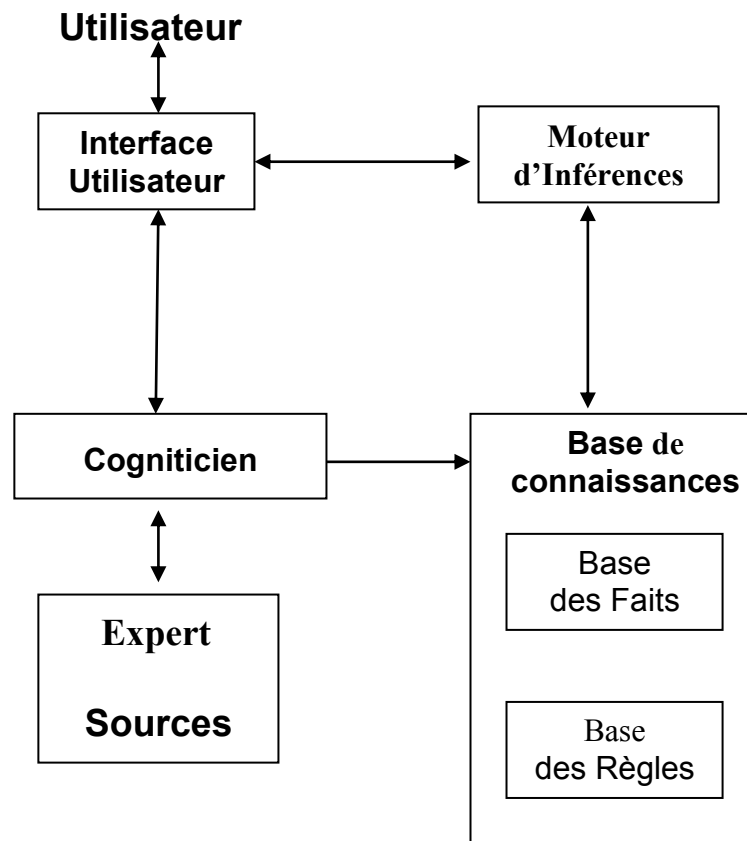
Certains problèmes se prêtent bien à la résolution par des SE. Les classes de problèmes appropriés sont répertoriées comme suit [27] :

- Le diagnostic : détection, diagnostic de pannes, diagnostic médical, maintenance
- Détection d'anomalies dans un système (circuit par exemple)
- Aide à la décision : ce sont des outils d'aide à la décision (exemple programme Conception et réalisation de serrures : Système interactif d'aide à la décision « intelligent » Application au renforcement des réseaux électriques urbains [28].
- La classification : (exemple classification des animaux mammifères, invertébrés)
- L'analyse de situations et gestion de crise (expertise financière, bancaire, juridique économique).

Parmi ces domaines, les applications de diagnostics se taillent la part du lion puisqu'elle représente environ 50% des développements de système experts [29].

#### 4.4 ARCHITECTURE GENERALE D'UN SYSTEME EXPERT

L'architecture d'un SE consiste en trois composantes interactives: une base de connaissances, un moteur d'inférences et une interface.



**Fig. 4-2** : Architecture général d'un système expert [25].

Un système expert est composé essentiellement voir figure 4-2 de :

- un langage d'expression des connaissances fournies par les experts.
- Une base de connaissances pour accueillir la connaissance spécifique d'un domaine d'application, qu'elle soit directement fournie par des experts ou qu'elle soit accumulée par le système lui même au fil des expérimentations,
- Un moteur d'inférence: programme relativement général qui exploite les connaissances de la base précédente en les considérant comme des données (donc susceptible d'être changées)
- Interface utilisateur

#### 4.4.1 langage d'expression des connaissances

Du point de vue de l'utilisateur humain, les langages naturels offrent (souvent mais pas toujours) la forme la plus confortable pour communiquer avec un système expert, qu'il s'agisse d'instruire le système (cas l'utilisateur expert) ou de consulter (cas de l'utilisateur ordinaire).

#### 4.4.2 Une base de connaissances

La base de connaissances contient toute l'information dont un expert humain aurait besoin pour s'acquitter de son travail, ceci dans un domaine donné on distingue dans cette base.

- a) Base des faits : elle contient des connaissances factuelles ou connaissances assertionnelles qui sont les données d'un problème, la description d'une situation donnée.
- b) Base de règles : elle contient les principes généraux, des règles, des heuristiques de résolution de problèmes qui représentent les modes de raisonnement propres au domaine considéré .Ce sont les connaissances déductives souvent représentées par ce qu'on appelle des *règles de production*. La connaissance de ces heuristiques peut provenir, de la part de l'expert humain, soit d'une accumulation d'observations empiriques, soit de connaissances techniques propres au domaine.

La base de règles comprend des granules de connaissances opératoires qui présentent le savoir faire sur le domaine. La représentation de la connaissance par des règles consiste à reproduire le savoir de l'expert sous la forme :

SI [Prémisse(s)] ALORS [Conclusion(s)]

La partie prémisse d'une règle décrit les conditions de déclenchement de la règle en termes de faits. La partie conclusion décrit les modes opératoires à réaliser en cas de déclenchement.

Une caractéristique importante de la base de règle est qu'aucune règle ne fait jamais référence à d'autres règles mais communique à travers la base de faits. Cette propriété est importante car elle permet d'ajouter ou de supprimer une règle de la base sans modifier le système.

Ces règles sont habituellement représentées par des expressions d'assez faible envergure pour être comprises aisément par un usage tout en correspondant à des opérations distinctes significatives dans le domaine [27].

#### **4.4.3 Un moteur d'inférences**

C'est un programme qui met en œuvre des mécanismes généraux de combinaison des connaissances ascensionnelles (faits) et connaissances opératoires (règles). Selon des stratégies variées, souvent très largement indépendants du domaine d'application, le moteur d'inférences puise parmi les règles, les interprète, les enchaîne jusqu'à satisfaire des conditions d'arrêt (qui dépendent du moteur et de la base de connaissances disponibles) en générale l'application des règles provoque des modifications de la base de connaissances, notamment dans sa partie «faits», parfois aussi dans sa partie «règles».

La résolution d'un problème sera par exemple concrétisée sous forme de proposition d'un diagnostic ou d'un plan d'actions, elle passe par l'application d'un ensemble de règles qui se conditionnent, indirectement, les unes les autres par leurs effets sur la base de connaissances.

#### **4.4.4 Interfaces utilisateur :**

- a) Une interface de saisie grâce à laquelle les utilisateurs pourront obtenir une consultation du système expert. Ce peut être un formulaire dans le cas d'un système fonctionnant en chaînage avant, ou un module de questions posées à l'utilisateur pour un système fonctionnant en chaînage arrière ou mixte.
- b) Une interface d'explication qui permet pour l'utilisateur à tout moment de questionner le système pour comprendre pourquoi une information lui est demandée.

#### **4-5 INTERVENANTS**

Le développement d'un système expert fait appel à différentes catégories de compétences, on distingue :

- L'expert : celui qui dispose des connaissances (le savoir et le savoir-faire), Qui sait résoudre le problème pour lequel on envisage un système expert, de plus, comme tout être humain, un expert dispose de capacités d'abstraction, (le raisonnement de bon sens... .qu'il utilise pour construire et exploiter au mieux son expertise.
- le cogniticien : celui qui va, à partir des connaissances de l'expert, concevoir ne mise en forme du problème.
- L'informaticien : celui qui écrit le système (au sens informatique).
- L'utilisateur : celui qui utilise le système expert dans des conditions réelles, notons que, l'utilisateur étant rarement un expert, la prise en compte de ses besoins, de son attente et de ces compétences spécifiques est élément essentiel d'un développement de système expert.

#### **4-6 TECHNIQUES DE PRESENTATION DE LA CONNAISSANCE**

Il existe deux types de reconnaissance constituant le savoir de l'expert [30].

- Les connaissances indiscutables constituant le savoir de l'expert.
- Les connaissances intuitives regroupant les convictions personnelles de l'expert appelées connaissances heuristiques.

Représenter les connaissances dans un ordinateur consiste à trouver une correspondance entre le monde extérieur et un système symbolique permettant de raisonner. Il n'existe pas de formalisme idéal pour représenter les connaissances. Certains formalismes sont plus inadéquats que d'autres pour représenter des mécanismes de raisonnement purement logiques ; d'autres s'avèrent plus adéquats pour codifier des raisonnements par analogie. La puissance d'une représentation se juge à sa capacité d'exprimer avec finesse des assertions complexes, à sa capacité de représenter deux assertions ayant une partie commune. En plus de la clarté conceptuelle de la représentation, une telle caractéristique permet une économie de mémoire car on n'a pas besoin de dupliquer les propriétés communes ; celles-ci sont représentées une seule fois au niveau le plus général possible. La

puissance de représentation se juge aussi à la faculté de manipuler des raisonnements incertains [30].

Les modes de représentations des connaissances se divisent en deux familles :

1/ Formalismes basés sur des fondements mathématiques

- Logique
- Règles de production

2/ Représentations structurées

- Réseaux sémantiques
- Objets structurés : représentation des connaissances par objets
- Représentations hybrides : règles + objets

#### **4.6.1. Logique des propositions**

Le calcul des propositions se définit d'une part par sa syntaxe régissant l'ensemble des assertions exprimables dans un langage et d'autre part par ses règles d'inférences décrivant comment on peut créer de nouvelles propositions à partir d'anciennes. Toute assertion est affectée de l'une des deux valeurs VRAI ou FAUX.

Le calcul des propositions repose sur la règle du Modus Ponens qui veut que si  $A \Rightarrow B$  et que A est VRAI alors B est VRAI et du Modus Tollens [31],

$$\text{alors } A \Rightarrow B \equiv (\neg B \Rightarrow \neg A).$$

Il est souvent pratique pour montrer que  $A \Rightarrow B$  est VRAI de supposer que B n'est pas VRAI et de montrer que l'on aboutit à non A ce qui contredit l'hypothèse initiale qui était A, donc l'hypothèse non B est fautive et donc B est VRAI (raisonnement par l'absurde).

#### **4.6.2. Calcul des prédicats**

Le calcul des prédicats est une extension du calcul des propositions. Il comporte la notion de prédicat et de symbole de qualification universelle et d'existentialité ( $\forall, \exists$ ). Son intérêt par rapport au calcul des propositions est l'introduction de la notion de variable. Un prédicat est une fonction prenant un ou plusieurs arguments et retournant l'une des valeurs VRAI ou FAUX.

Par exemple :

IMPAIR (X) : « X est impair » aura la valeur VRAI si X=5 et FAUX si X=4.

### 4.6.3. Réseaux sémantiques

Les réseaux sémantiques permettent de décrire et de classer les objets du monde réel. Un réseau sémantique est un ensemble de nœuds appelés concepts, reliés par des arcs exprimant les relations qui peuvent exister entre ces nœuds. Les concepts peuvent être des entités, des individus, des situations, etc. Les nœuds jouent le rôle des termes (arguments) et les arcs celui des prédicats en logique [32].

La figure 4-3 présente un Exemple

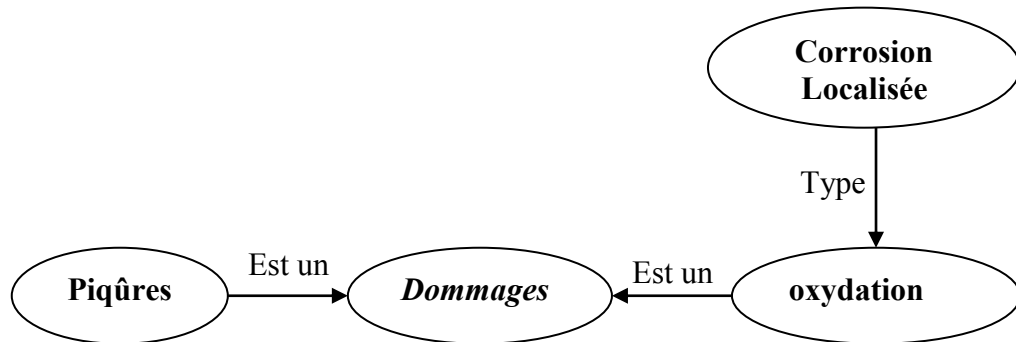


Figure. 4-3 : Réseaux sémantiques

Pour modéliser la connaissance sous forme de réseau sémantique, il faut définir avec précision les concepts et leurs interrelations.

Les avantages d'une telle représentation sont multiples:

- un élément n'apparaît qu'une seule fois, alors qu'il peut intervenir dans la description de plusieurs concepts.
- de nombreuses relations entre les éléments ne sont pas exprimées, l'interpréteur du réseau les retrouve.

Permis ces inconvénients il devient vite très complexes en augmentant le nombre de concepts et relations.

Le formalisme (ou le mode) de représentation des connaissances est un moyen d'expression de la réalité. Les différents modes de représentation de la connaissance sont :

- Règles de production.
- Réseau sémantique.
- Les schémas ou objets structure
- Les langages orientés objets

#### 4.6.4. Règles de production

Le mode de représentation à base de règles de production est le mode le plus utilisé actuellement. Un système à base de règle de production est un ensemble de règle qui sont activés par un mécanisme de raisonnement appelé moteur d'inférences.

Une règle est composée de deux parties la condition ou prémisse, et l'action ou conclusion

**SI**      $A_1, \dots, A_n$      **ALORS**      $B_1, \dots, B_m$

**Tableau 4-1** : Les deux parties d'une règle

Partie	Définitions	Type
A	Condition, Prémises, partie condition, déclencheur, partie gauche	Peut être composée ou simple $n \geq 1$
B	Conclusions, partie action, corps, partie droite	Peut être composée ou simple $m \geq 1$

Exemple de règle de production pour un système d'évaluation de la sévérité d'un dommage sur un pipeline

**Si** Diamètre\_piqûre  $\geq 1$  mm **Et** Densité\_piqûre = 10%

**Et** Profondeur\_piqûre  $\geq 2$  mm

**Alors** Dommage\_piqûre = Très sévère

Dans la règle précédente, on recense plusieurs notions :

- Un Attribut : Diamètre\_piqûre, Densité\_piqûre, Profondeur\_piqûre, Dommage\_piqûre sont des attributs
- Une Valeur : 1mm, 10%, 2mm, Très sévère sont des valeurs.
- Un Opérateur : c'est ce qui lie un attribut et une valeur. Dans notre cas, on a des opérateurs =.
- Des connecteurs ici de conjonction : "et".



La partie gauche de la règle est appelée sa prémisse. La partie droite sa conclusion.

Une chose importante à comprendre est le fait que les opérateurs et les valeurs de la prémisse sont des opérateurs et des valeurs de comparaison ; Alors que les opérateurs et les valeurs de conclusion sont des opérateurs et des valeurs d'affectation.

### ***Déclenchement de la règle :***

Le système vérifie la prémisse en comparant les valeurs des attributs avec la base de fait. . Par exemple, il va comparer Largeur\_piqûre à la valeur 1mm, et si c'est le cas, c'est-à-dire si le diamètre de piqûre observée est effectivement  $\geq 1\text{mm}$ , alors, le système passe à la prémisse suivante. Si la Densité\_piqûre observée est effectivement égale à 10%, alors la règle se déclenche.

Le déclenchement de la règle conduit à l'exécution des affectations de valeurs aux attributs présents en conclusion. Cela veut dire que le système tire les conclusions. Il affecte les valeurs en conclusion à leurs attributs respectifs. Par exemple il déduit que l'attribut Dommage\_Fissure est Très sévère.

Par contre, si l'une des prémisses n'avait pas été vérifiée alors la règle eût été abandonnée.

Finalement, tout le but du système expert est d'affecter des valeurs à des attributs en déclenchant des règles.

### ***Notion de fait :***

Le raisonnement va se baser sur les faits pour déduire des conclusions, qui sont des affectations d'attributs dont on ignorait les valeurs.

En résumé nous avons :

- Règle - Règle qui se déclenche
- Attribut - opérateur - valeur
- Prémisse - conclusion
- Fait

### **Remarque**

- Il peut y avoir des disjonctions "ou" en prémisse de la règle
- Une règle peut comporter plusieurs conclusions liées par des "et" conjonctifs

L'ensemble des règles est rassemblé dans la base de connaissances, Les règles actionnées par le moteur d'inférences travaillent sur des faits. Les faits, rassemblés dans la base de faits, sont en quelque sorte les données sur lesquelles travaillent les règles.

Le moteur d'inférences est le mécanisme de raisonnement à ce titre, il porte l'aspect dynamique au système. Dans une première approche nous dirons que les règles décrivent le domaine d'expertise et que le moteur d'inférences simule le raisonnement.

Le moteur d'inférences autorise en général deux stratégies de raisonnement :

- Le chaînage avant, ou stratégie dirigée par les faits.
- Le chaînage arrière, ou stratégie dirigée par les buts.

On parle chaînage avant lorsque cycle, le système considère les règles dont les conditions sont remplies, ajoute les conclusions de ces règles (lesquelles sont alors démontrées) aux faits connus. La combinaison de ces nouveaux faits avec ceux qui existent déjà permet et de poursuivre le raisonnement. Le processus se répète jusqu'à épuisement des règles et on examine alors la base de faits finale pour savoir ce que le système expert a permis de conclure, soit l'on arrive à un fait considéré comme une conclusion.

On parle de chaînage arrière lorsqu'on considère qu'à un moment donné, on cherche à établir la véracité d'un fait. Pour ce faire, à moins que la conclusion attendue fasse déjà partie de la base de faits, auquel cas la démonstration est terminée, on considère les règles permettant de conclure sur ce fait. Il suffit alors que les conditions d'une au moins de ces règles vérifiées pour entraîner la véracité de la conclusion. Ces conditions deviennent de nouveaux faits à établir, ce qui permet d'itérer le processus, soit jusqu'à ce qu'on ne puisse plus faire évoluer la situation (ce qui est un cas d'échec), soit jusqu'à ce qu'ayant reconnu suffisamment de faits avérés on puisse considérer le but comme démontré [30].

Assez schématiquement. Car dans les systèmes experts réels on s'efforce de programmer des garde-fous. On peut indiquer que le risque principale du chaînage avant est la production de faits inutiles ou sans intérêt, Le risque du chaînage arrière est plutôt de prendre du temps à chercher à démontrer des buts par des voies qui n'aboutissent pas.

Certains systèmes permettent de passer, lors de différentes étapes de raisonnement du vocabulaire de « chaînages mixtes ».

#### **4.6.5. Représentation par objets**

L'idée est de regrouper dans une même entité « l'objet » toute information associée à un concept de l'univers du discours. L'information associée à un objet se trouve dans cet objet ou peut être acquise à partir de l'objet.

#### **4.6.6. Caractéristiques des objets structurés**

Un objet est une structure à trois niveaux : **attribut, facette, valeurs** [31].

Un objet contient un certain nombre d'ASPECTS ou ATTRIBUTS (slots) qui sont les noms des propriétés caractérisant l'objet : ces noms sont spécifiques d'un objet ; par exemple on parle de portée de section droite, de flèche pour une poutre. Ces Attributs contiennent des FACETTES qui sont bien répertoriées (standards) ; il y'a par exemple une FACETTE appelée VALEURS-POSSIBLES qui spécifie l'ensemble des valeurs permises pour l'ASPECT considéré ; une autre FACETTE s'appelle DEFAUT et indique la valeur par défaut de l'aspect en question, par exemple l'objet poteau court peut avoir l'ASPECT « mode de rupture » ayant par défaut le mode « cisaillement ». Un objet peut être représenté dans une hiérarchie et avoir des objets plus moins généraux que lui (l'objet DOMMAGE FISSURE est moins général que L'objet DOMMAGE mais plus général que l'objet LARGEUR FISSURE).

#### **4.6.7. Langages objets**

La programmation objet amène à structurer l'univers d'une application en termes d'objets plutôt qu'en termes de procédures. On distingue trois grandes familles de langages à objets, chacune privilégiant un point de vue sur la notion d'objet: [30]

- *Le point de vue structurel* : l'objet est un type de données, qui définit un modèle pour la structure de ses représentants physiques et un ensemble d'opérations applicables à cette structure.
- *Le point de vue conceptuel* : l'objet est une unité de connaissance, représentant le prototype d'un concept.
- *Le point de vue acteur* : l'objet est une entité autonome et active, qui se reproduit par copie.

## A) Langages des classes :

Les langages appartenant à la première catégorie sont appelés langage de classe.

### 1) **Classes :**

Une classe est la description d'une famille d'objets ayant même structure et même comportement. Elle regroupe un ensemble de données et un ensemble de procédures ou de fonction. Chaque classe possède une double composante [33] :

- Une composante statique, les données, constituées de *champs* nommés, qui possèdent une valeur. Les champs caractérisent l'état des objets pendant l'exécution du programme.
- Une composante dynamique, les procédures appelés *méthodes*, qui représentent le comportement commun des objets appartenant à la classe. Les méthodes manipulent les champs des objets et caractérisent les actions pouvant être effectuées par les objets.

### 2) **Instanciation:**

La classe est l'entité conceptuelle qui décrit l'objet. Sa définition sert de modèle pour construire ses représentants physiques appelés *instances*. Une instance est donc un objet particulier qui est créé en respectant les plans de construction donnés par sa classe. Celle-ci joue le rôle de moule permettant de reproduire autant d'exemplaires que nécessaire.

Puisque les méthodes représentent les comportements communs aux instances, Il est inutile de dupliquer le dictionnaire des méthodes, qui est par conséquent détenu par la classe.

De plus si les instances d'une classe possèdent les mêmes champs (appelés également variables), ceux-ci prennent cependant des valeurs différentes correspondant à la nature particulière de chaque instance : la liste des champs reste donc détenue par la classe, tandis que les instances en possèdent les valeurs.

Une instance ne peut exister sans sa classe d'appartenance, qu'elle connaît grâce à la relation d'instanciation

### 3) **Héritage :**

- Spécialiser et factoriser

Il s'agit d'un problème de partage efficace de connaissances. La classe doit être considérée comme un réservoir de connaissances à partir duquel il est possible de définir d'autres

classes plus spécifiques, complétant les connaissances de leur classe mère. Les connaissances les plus générales sont ainsi mises en commun dans des classes qui sont ensuite spécialisées par définitions de sous-classe successives, contenant des connaissances de plus en plus spécifiques.

Une sous-classe est donc une spécialisation de la description d'une classe, appelée super classe, dont elle partage les variables et les méthodes. Conceptuellement tout se passe comme si les informations de la super-classe étaient recopiées dans la sous classe : une sous-classe hérite des informations de sa super-classe.

La spécialisation d'une classe peut être réalisée selon deux techniques. La première est l'enrichissement : la sous-classe est dotée de nouvelles variables et/ou de nouvelles méthodes représentant les caractéristiques propres des sous-ensembles d'objets ainsi décrit. La seconde technique est la substitution qui consiste à donner une nouvelle définition à une méthode héritée lorsque celle-ci se révèle inadéquate pour l'ensemble des objets décrits par la sous-classe.

- Graphe d'héritage :

La relation d'héritage lie une classe à sa super-classe. Les classes sont organisées hiérarchiquement. Le graphe constitue un arbre dont la racine (Root) représente la classe la plus générale, appelée objet. Cette classe est prédéfinie et détient le comportement commun à tous les objets : comment imprimer un objet, comment trouver la classe d'appartenance d'un objet...etc. C'est à elle que sont rattachées les classes de plus haut niveau.

La relation d'héritage est transitive : les caractéristiques des classes supérieures sont héritées par les classes inférieures, qui sont d'autant plus spécialisées qu'elles sont proches des feuilles de l'arbre. Par extension de la définition donnée précédemment, le terme super-classe désigne toute classe dont hérite une classe donnée.

La structuration en classe et sous-classe entraîne une modularité importante : La description de l'univers est divisée en parties indépendantes regroupant les objets par affinité. La modification de l'une d'elles n'entraîne qu'un minimum de modification des autres. Ce fait est bien mis en évidence par le graphe d'héritage : chaque sous arbre regroupe des objets partageant les caractéristiques de sa racine. En principe, la modification de cette racine n'a d'incidence que sur ses sous-classes [34].

## **B) Langages de frames :**

Un objet structuré peut être considéré comme un prototype c'est à dire un objet « idéal » servant de base de comparaison à d'autres objets à analyser. Il est possible qu'aucun objet ne corresponde exactement au prototype qui a été défini.

L'objet prototype peut être aussi bien une situation qu'un objet physique du monde. La comparaison entre l'objet à étudier et l'objet prototype fait généralement apparaître des différences bien qu'il y'ait en commun un certain nombre de propriétés fondamentales. Ces différences peuvent être le reflet d'exceptions par rapport au prototype ou simplement la spécification de détails non prévus dans le modèle idéal.

En résumé, on dira qu'un frame possède des attributs dont les différents aspects sont décrits par des facettes déclaratives ou procédurales. Les premières assoient des valeurs aux attributs, alors que les secondes décrivent des procédures appelées *réflexes*, qui sont activées lors des accès aux valeurs. Un frame n'a donc pas de comportement propre décrit par des méthodes : les opérations de manipulations des attributs sont détenues par les attributs eux-mêmes.

L'ensemble des frames est organisé en une hiérarchie d'héritage où, à la différence des classes, tout objet est à la fois un représentant des frames dont il est issu et un générateur de frames plus spécialisés [29].

## **C) Langages d'acteurs :**

La troisième famille regroupe les langages d'acteurs. Un acteur est un objet actif qui communique avec ses semblables par envois de messages. Son comportement est défini par un *script* qui décrit la manière dont il réagit aux événements provoqués par les autres acteurs. Contrairement aux classes, les acteurs ne sont pas organisés hiérarchiquement : chaque acteur est en relation avec d'autres acteurs auxquels il délègue les messages qu'il ne peut pas traiter, réalisant ainsi l'équivalent du mécanisme d'héritage.

Un acteur peut créer un autre acteur par copie de lui-même. La copie engendrée est soit rigoureusement identique, soit différentielles, c'est à dire spécialisé par adjonction de nouvelles caractéristiques. Ce mécanisme s'apparente à l'instanciation des langages de classe.

#### **D) Langages hybrides :**

S'ils existent des représentants « purs » de chacune des trois familles présentées, de nombreux langages intègrent des caractéristiques empruntées à l'une et à l'autre. Ils constituent une quatrième famille, celle des *langages hybrides*.

La conception de ces langages est généralement motivée par des besoins pratiques, particulièrement sensibles en intelligence artificielle. Il est difficile de représenter dans un formalisme objet des connaissances qui se traduisent plus naturellement en formules logiques ou encore en règles de production. Plutôt que de rester prisonnier d'un formalisme unique, il est commode d'en faire coexister plusieurs dans un même système.

Typiquement un langage hybride permet d'encapsuler des méthodes dans un *frame* ou bien d'associer des facettes aux variables d'instances d'une classe (*champs*), ce qui permet de bénéficier conjointement des avantages offerts par les classes et les *frames*. La plupart du temps, il comprend une composante de programmation logique.

#### **4.7. DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME EXPERT**

La démarche de développement d'un système expert représenté dans la figure 4.1 est la suivante [34] :

Phase 1 : Identification et justification du problème : Il s'agit d'identifier le domaine du problème et justifier de l'utilisation d'un système expert pour résoudre ce problème.

Phase 2 : S'assurer de la disponibilité d'un expert avec une connaissance durant la durée du projet.

Phase 3 : Sélection des outils de programmation c'est à dire le Shell ou SE vide.

Phase 4 : Conceptualisation, formalisation, et implémentation c'est à dire trouver les concepts pour représenter et organiser la connaissance. La représentation de la connaissance et l'implémentation du système consiste à formuler c'est à dire à transcrire les connaissances de l'expert du domaine en des règles dans un format précis qui dépend du Shell utilisé.

Phase 5 : Formalisation, trouver une structure pour organiser les connaissances avec acquisition et représentation de la connaissance.

Phase 6 : Implémentation du système, formuler les règles pour réunir la connaissance.

Phase 7 : Maintenance et mise à jour

Phase 8 : Test et validation des règles : il s'agit dans cette phase de vérifier :

- s'il y a concordance entre les conclusions auxquelles le système aboutit et les résultats de l'expert humain sur des cas identiques. Cette phase consiste à soumettre le système à des études de cas précis puis à confronter les résultats du système avec des experts.
- La qualité de la consistance du système c'est à dire que l'interaction entre l'utilisateur et le système soit cohérente (ordre des questions, contenu des questions)
- Que les performances du système ne se dégradent pas brutalement lorsque le problème sort de leur domaine de compétence qui est souvent étroit. Les systèmes doivent garder une certaine capacité d'inférer des données manquantes par un raisonnement de bon sens. Les performances du système doivent diminuer de façon continue aux bornes du domaine

Ces étapes sont récapitulées dans l'organigramme suivant ci-dessous (figure 4.4).



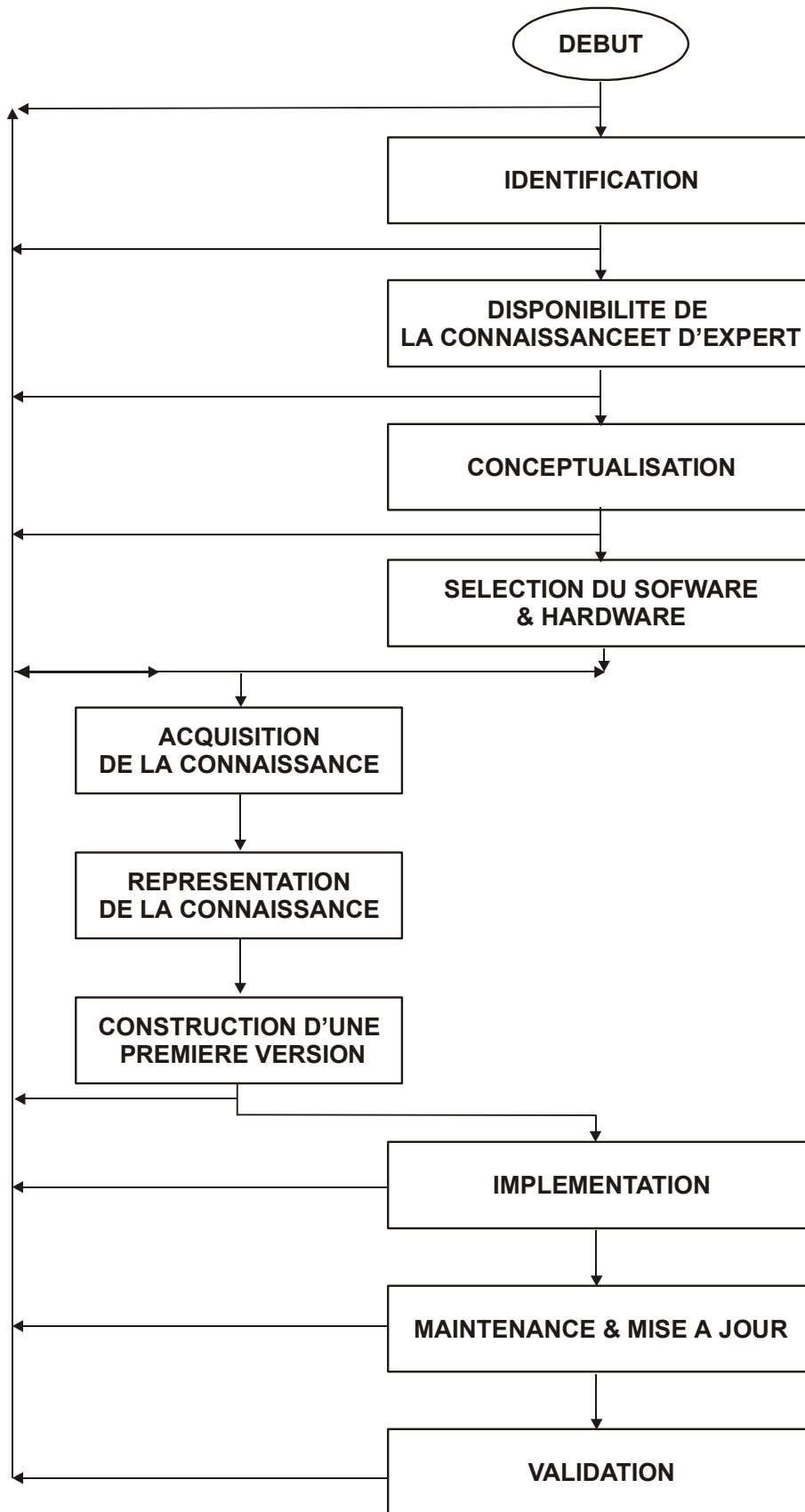


Figure 4-4 : Processus de développement d'un système expert [30]

Les systèmes experts sont conçus grâce à la contribution de :

- l'expert du domaine
- l'ingénieur de la connaissance ou le cogniticien

L'expert décrit son activité par un récit, il utilise ses connaissances des heuristiques qui reposent sur son expérience. L'utilisation d'heuristiques fournit une bonne solution et non pas la solution optimale qui n'existe pas toujours.

Le cogniticien formalise la connaissance en choisissant une représentation appropriée et une stratégie d'inférence. Il guide l'expert du domaine dans le développement d'une base de connaissance qu'il implémente par la suite en utilisant les langages ou les outils qui supportent les techniques adéquates de représentations des connaissances d'inférence et de contrôle.

#### **4.8. RESULTATS ATTENDUS D'UN SYSTEME EXPERT**

La réalisation d'un système expert peut être envisagée avec des objectifs très variés.

##### **4-7-1 Diffusion d'un savoir :**

C'est le plus souvent l'idée qui préside à réécriture d'un système expert : rendre la connaissance, l'expertise sur un domaine accessible sur le terrain de façon à limiter autant que faire se peut le recours à l'expert avec les problèmes de disponibilité, de délai d'intervention que cela pose.

##### **4-7-2 Assistance de l'expert :**

En effet, le système, même il reste moins puissant que l'expert, s'il n'a pas ses qualités d'intuition, d'imagination, peut lui fournir une aide appréciable en étant beaucoup plus systématique, en n'oubliant pas certaines hypothèses même peu probables, en se chargeant de l'aspect fastidieux de certaines études afin que l'expert puisse consacrer son talent aux aspects plus délicats pour lesquels il est indisponible.

##### **4-7-3 Formation, enseignement :**

La disponibilité des systèmes expert peut aussi en faire des outils de formation, d'une part, en soumettant des cas, des variants, au systèmes et en comptant leurs réponse aux siennes, les élèves ont à leur disposition un professeur au savoir étendu, de plus, sous certaines

réserves( importants), un système expert peut « expliquer » ce qu’il fait et comment il atteint ses buts.

#### **4-7-4 Recueil, Conservation, Sauvegarde de connaissances :**

Un système expert est un recueil de connaissances, il peut donc être utilisé pour archiver celle-ci puis la consulter selon les besoins, même en dehors d’une utilisation opérationnelle du système expert, une idée souvent mentionnée consiste aussi à envisager un système expert pour conserver le savoir d’un expert, conduit, lui, à se retirer (changement de

### **4.8. SYSTEMES EXPERTS DANS LE DOMAINE DE LA CORROSION**

Comme dans tous les domaines de la science, le domaine des sciences des matériaux s’est développé en diverses disciplines. Chaque discipline a ses propres complexités et un niveau spécifique d’expertise, par conséquent il devient difficile pour un ingénieur de maîtriser toutes ces disciplines. Plusieurs auteurs ont vu l’utilité de développer des systèmes experts dans ce domaine [31,32].

Les domaines du diagnostic, de la conception, de la maintenance et de la réparation sont des domaines où beaucoup de systèmes experts ont été développés. Quelques-uns sont présentés dans le tableau 4-2.

**Tableau 4-2 :** Quelques systèmes experts dans le domaine des sciences des matériaux [30]

<b>Système expert</b>	<b>Description</b>
CORREAU	Corrosion du cuivre par les eaux naturelles
ESCPSS	Expert-System for Corrosion Protection of Ship Structures
ERICE	Expert reasoning instrument for corrosive environments
ES-EPA	Expert system for environmental pollutant analysis
CHESS	Chemistry-based expert system shell
CEMOG	Expert System for Corrosion Evaluation and Material Selection in Oil and Gas Wells

#### **4-9 CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue d'ensemble sur les systèmes experts, leur caractéristiques et leur rôle pour représenter le savoir faire des experts humains. Nous avons également présenté les différents aspects fondamentaux des systèmes à base de connaissances et leurs mécanismes de raisonnement. Différents modes de représentation ont été décrits, l'accent a été mis notamment sur les règles de production.

## **CHAPITRE 5**

APPROCHE ECOR:EXPERT

l'Estimation des dommages

**COR**rosifs des conduites (pipeline)

### **5.1. L'APPROCHE ECOR : expert**

Dans le cadre de ce travail, nous avons mis en exergue la problématique soulevée par l'évaluation et l'estimation des endommagements causés par la corrosion localisée sur les structures métalliques, nous avons montré pourquoi il était plus que nécessaire de développer une approche informatisée (IT) qui soit à la fois rapide, fiable, rationnelle et capable d'offrir grâce à l'introduction d'un système expert une formalisation de la connaissance et du savoir des experts humains du domaine de la corrosion métallique [4].

Le système expert est un générateur de système à base de connaissances S.B.C (KBS) qui permet une représentation de la connaissance grâce à des règles de production et à une représentation orientée objet (objet, attributs, valeur avec variables) utilisant un héritage simple. Ses connaissances concernant l'évaluation des dommages causés par la corrosion sur les structures métalliques.

Le système expert développé se présente sous la forme de trois (3) modules avec une étape préliminaire présentée au début de la consultation comme indiqué sur la figure 5-1.

Comme indiqué par l'organigramme, le système débute par une phase préliminaire qui consiste à saisir des informations au regard d'une fiche client mise à la disposition de l'utilisateur (où figure le nom de l'organisme demandeur de l'expertise, le nom de la personne rencontrée, sa fonction, adresse, téléphone, fax ...etc.), elle renferme également une identification de l'installation métallique.

Une description sommaire de la structure métallique est également fournie .Au vu de ces informations, un premier ensemble de règles est activé. Le module 1 concerne la saisie des données relatives aux types de dommage développés sur la structure métallique [35]. L'utilisateur introduit les observations visuelles et d'autres données des dommages à travers l'interface.

Le module 2 concerne l'estimation des dommages à travers un deuxième ensemble de règles chargées de donner une évaluation des dommages

Le module 3 apporte les recommandations nécessaires en termes de réparation et de lutte contre la corrosion en fonction du degré d'endommagement de la structure métallique. Ceci est assuré par un troisième ensemble de règles [36].

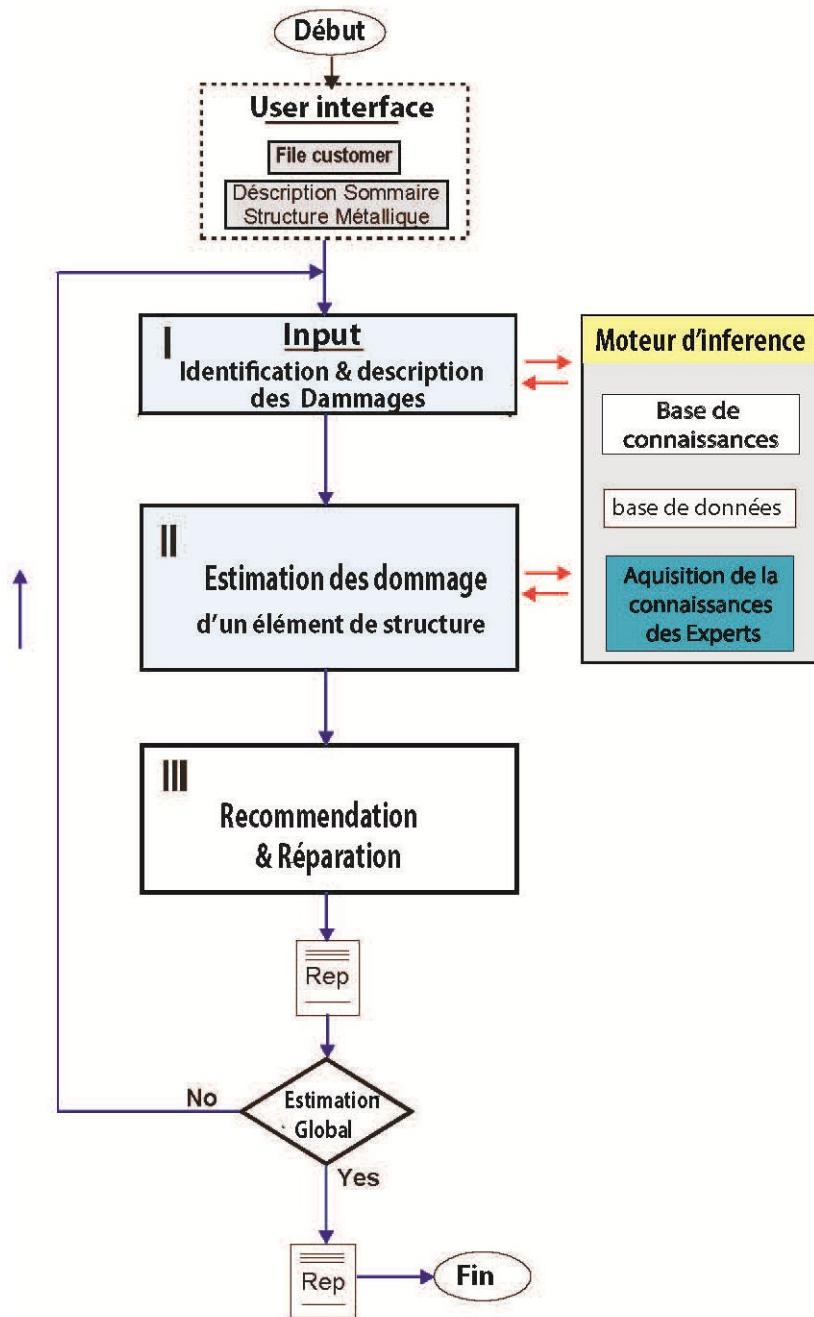


Fig 5-1 Organigramme général de notre système expert

## 5.2. CONSULTATION de ECOR : expert

Le système ECOR commence par l'ouverture de la fenêtre de bienvenue qui affiche le logo du système et donne accès aux différentes fonctionnalités du système à travers une série de boutons de sélection (Figure 5-2). Lors de la phase préliminaire certains renseignements fournis par l'utilisateur à travers l'interface 2 notamment la fiche client et l'identification de l'installation sont facultatifs en ce sens qu'ils ne sont pas utilisés par le système pour aboutir à des conclusions.

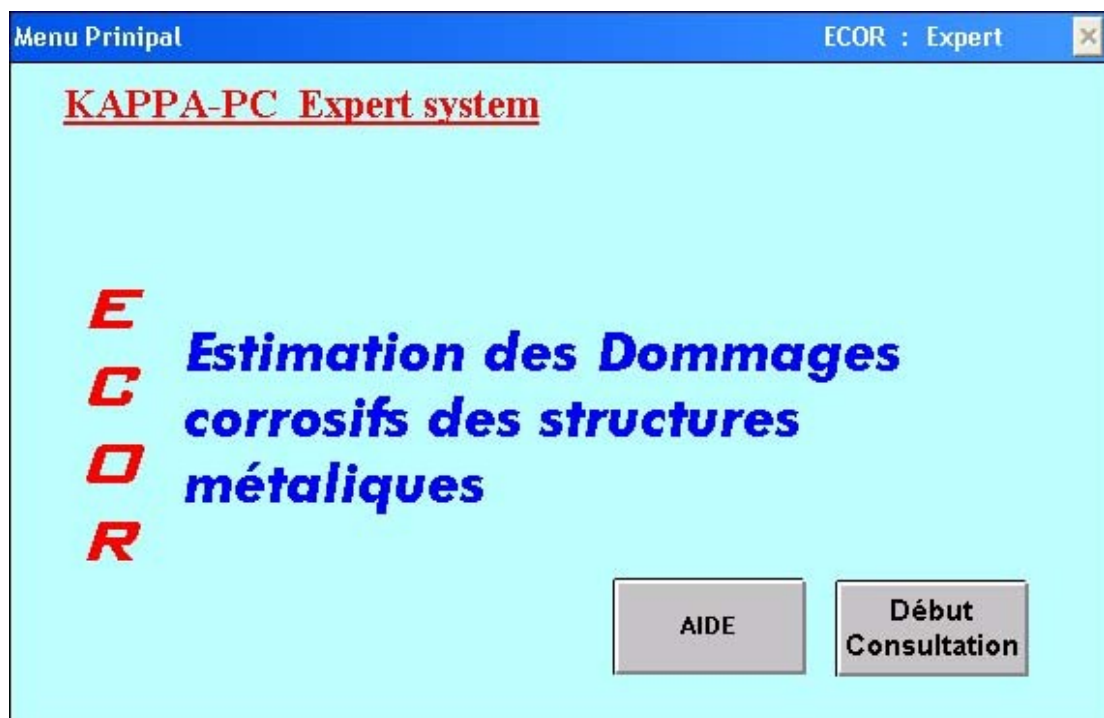


Fig 5-2 Interface 1

Lors de la phase préliminaire certains renseignements fournis par l'utilisateur à travers l'interface 2 notamment la fiche client et l'identification de l'installation sont facultatifs en ce sens qu'ils ne sont pas utilisés par le système pour aboutir à des conclusions.

### 5.2.1. Description du module 1

Le module 1 concerne l'identification des types de dommage sur un organe de structure qui sera le pipeline (conduite). Celui-ci introduit les observations visuelles ou autres données recueillis à travers différentes méthodes d'inspections des types de dommages comme différent types de corrosion, fissuration,. Une observation détaillée de chaque type de



dommage comme ouverture maximale de piqûre ou cratère, nombre de piqûre ou cratère par unité de surface, localisation de la piqûre ou cratère, est fournie par l'utilisateur à travers les interfaces figure 5-2 (Annexe 1). Cette interface donne accès à l'estimation des dommages par élément (module 2) [37].

### **5.2.2. Description du module 2**

Le but de ce module est d'apprécier la sévérité des dommages à travers un calcul d'indice d'endommagement au niveau d'un élément de pipeline de la structure à partir d'observations visuelle et des mesures des épaisseurs que l'utilisateur introduit dans le module 1.

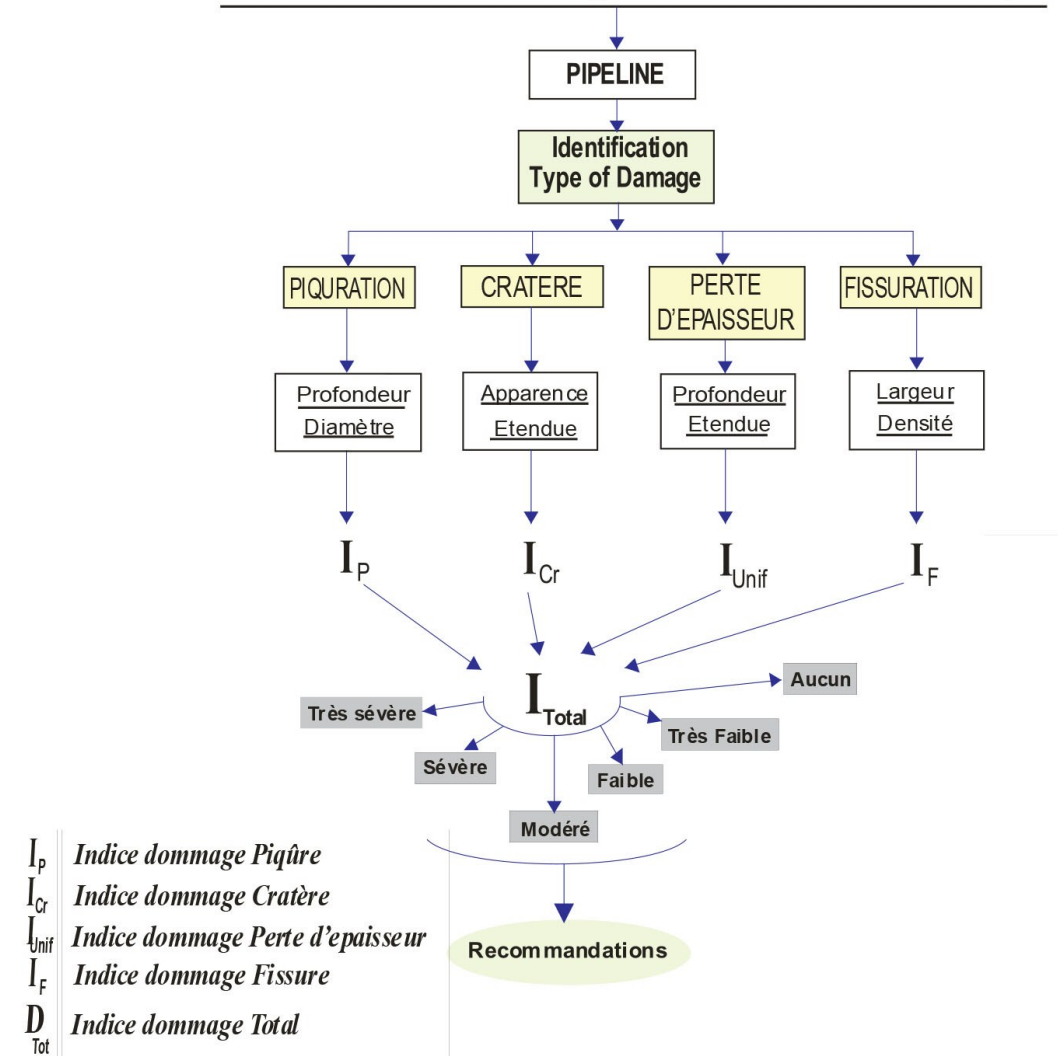
Comme il est indiqué dans l'organigramme (Figure 5-3), l'estimation de la sévérité d'indice d'endommagement total à l'échelle d'un élément de la structure métallique passe par l'estimation des sévérités des indices d'endommagement différents types de dommages tels que piqûre, cratère, fissuration, percement ...etc. L'estimation de la sévérité indice d'endommagement de chaque type de dommage comme c'est le cas pour une piqûre de corrosion passe par l'estimation de certains paramètres liés à la forme de piqûre tels que diamètre de piqûres, profondeur de piqûre, densité de piqûre (nombre de piqûres par unité de surface). Par exemple l'estimation de la profondeur de piqûre est basée sur un indice  $I_{DP}$  (indice profondeur de piqûre) qui varie de 0 à 5 en fonction de la profondeur de la piqûre. Chaque valeur de l'indice profondeur de piqûre est associée à une sévérité par le biais d'un descripteur littéral (aucune, très faible, modéré, sévère et très sévère) [38].

A ce niveau, La classification de différents paramètres de dommage permet donc de lier le degré des indices de sévérités aux observations visuelles. Cependant, la problématique est de savoir comment combiner ces deux aspects pour atteindre le degré de dommage par piqûres de corrosion, en tenant considération de l'influence de la profondeur de piqûre par rapport au diamètre et la densité de piqûres?, d'où la pratique de la hiérarchisation analytique AHP figure 5-3, semble être un outil utile pour résoudre cette problématique et a été utilisé pour atteindre cet objectif [39].

Cette méthode fournit une analyse logique et explicite du problème, grâce à une structuration ou hiérarchisation des différents facteurs et un établissement des priorités.

L'utilisation de la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) dans le cadre de notre projet sera décrite ultérieurement.

## Evaluation de l'endommagement de structure métallique



**Fig 5-3** Module 2 : estimation des dommages

### 5.2.3. Description du module 3

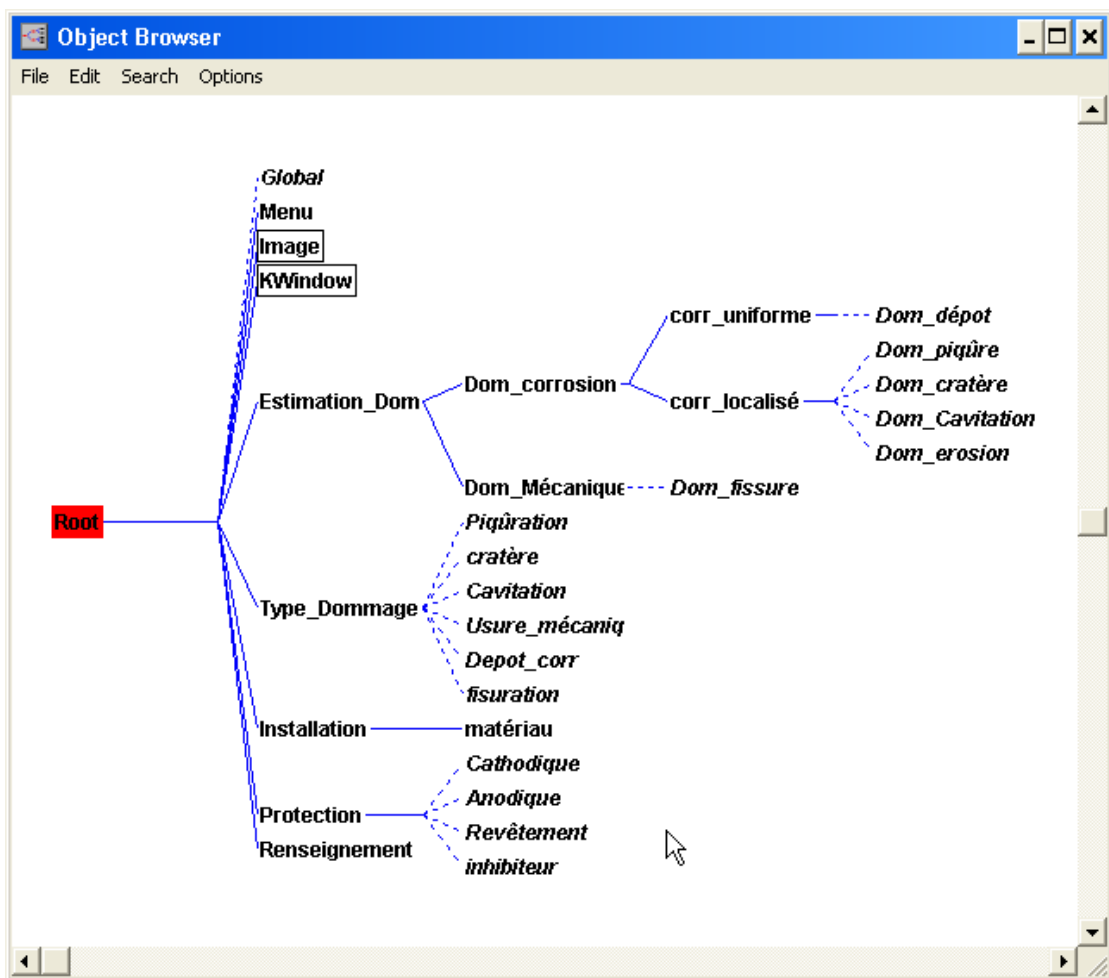
Ce module est chargé de préconiser à travers un ensemble de règles les recommandations concernant les mesures d'urgence et des procédures de réparation ou de remplacement des pièces endommagées. Comme il est indiqué sur la (Figure 5-1), ce module prend comme hypothèse les résultats provenant des modules 1 et 2. Si le niveau de sévérité de l'élément estimé dans le module 2 est sévère ou très sévère, le module propose des mesures d'urgence concernant la réparation ou le remplacement de l'élément.

Après les phases estimation, méthodes de restauration ou de remplacement de l'élément endommagé, toutes les données du problème (observations visuelles) et toutes les

conclusions auxquelles le système a abouti sont stockées dans un fichier et sont restituées à la demande de l'utilisateur sous forme de rapport.

L'approche proposée sera développée dans le système expert Kappa-pc [40]. Généralement la méthode adoptée permet de considérer le problème de l'estimation des dégâts comme un tout et prend en compte la contribution simultanée des différents types de dommages corrosifs et leurs influences les uns par rapport aux autres sur l'endommagement total de l'élément du pipeline.

Les types de dommage et leurs facteurs sont structurés selon une arborescence à travers l'utilisation de classes, de sous classes et d'instances faisant intervenir des attributs et leurs valeurs. Le graphe d'héritage dans KAPPA-PC est un arbre. Les informations ou connaissances du domaine sont représentées dans cet arbre comme indiqué sur la figure 5-4.



**Fig 5-4** Le graphe d'héritage dans ECOR : expert

### **5.3. APPROCHE D'ÉVALUATION DES DOMMAGES**

Après avoir déterminé les modes de rupture de l'élément, la sévérité des dommages est évaluée à partir des suppositions suivantes :

1. L'endommagement total dépend du type d'élément estimé
2. L'endommagement total dépend de la sévérité des dommages de chaque condition de rupture (piqûration, fissuration,...etc.) avec une certaine influence de chacune sur l'endommagement total de l'élément de structure [41].
3. La sévérité du dommage de chaque signe de rupture dépend de la sévérité de l'apparence de ce signe de dommage. Différents facteurs d'apparence sont considérés (Profondeur de perte d'épaisseur et de piquûre, largeur de fissure, étendue de fissure, profondeur de l'étendue des cratères..) [42].
4. Une échelle de 6 niveaux de sévérité est utilisée pour classer les dommages à travers l'introduction un système d'indices [38].
5. A chaque niveau de sévérité, ou indice correspond un descripteur littéral (très sévère, sévère, modéré, faible, très faible ou insignifiant)
6. L'état de service, l'état de sécurité, l'esthétique, le coût des réparations, sont autant de critères au regard desquels l'estimation de l'endommagement de l'élément de structure se fera.

Cependant il est à noter que dans le cadre de notre travail, seul l'état de sécurité a été considéré. L'évaluation des dommages est basée principalement sur des observations visuelles de l'état d'endommagement des éléments de structures métallique. La méthode (AHP) permet d'exploiter ces informations de manière logique et rationnelle [43].

#### **5.3.1. Méthode analytique de hiérarchisation (AHP)**

La méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été développée par THOMAS L.SAATY, un mathématicien nord-américain spécialisé dans la modélisation du processus de prise de décision se rapportant à des problèmes complexes non structurés [39].

##### **5.3.1.1. Définition**

Les décideurs ou chefs d'entreprises sont confrontés quotidiennement à la nécessité de prendre des décisions concernant des problèmes dont les facteurs sont interdépendants et

de nature différentes, de telle sorte que l'intuition, et la réflexion s'avèrent généralement insuffisants.

L'AHP est une méthode qui fournit la possibilité de considérer tous les éléments d'un problème, en le subdivisant en sous problèmes, et ce en faisant appel à des couples de jugement afin de développer une hiérarchie. Le résultat obtenu est une matrice finale représentant les priorités générales des alternatives les uns par rapport aux autres. Une décision logique basée sur un arrangement de comparaisons entre les critères et les alternatives est prise. Cette méthode permet d'établir des comparaisons simples entre les facteurs développées dans la décision. D'où la hiérarchisation de la décision permet également d'aboutir à la prise d'une décision logique basée sur une méthode analytique, ce qui a pour effet d'éliminer une bonne part du hasard auxquels sont confrontés les décideurs lors du processus de prise de décision [44]. Cette méthode d'aide à la décision à aspects multiples, tolérant une incertitude acceptable sur les données et les jugements.

C'est une méthode analytique du fait qu'elle est basée sur un raisonnement mathématique et logique permettant l'utilisation de nombres développés par SAATY [45] à travers une échelle représentant l'importance relative des différents aspects d'un problème les uns par rapport aux autres.

C'est une méthode d'hiérarchisation en ce sens qu'elle permet une structuration du processus de prise de décision correspondant à la compréhension du problème.

Pour un complément de définition de la méthode (AHP), un extrait de Saaty [46] est disponible en annexe 3.

### **5.3.1.2. Différentes étapes de la méthode AHP**

La méthode AHP est basée sur les cinq (5) étapes suivantes :

#### **1<sup>ère</sup> Etape :**

Définir complètement le problème et développer une hiérarchie qui aura pour but de représenter précisément le problème en suivant les directives ci-dessous :

Niveau 1- But final ou objectif à atteindre

Niveau 2- Critères utilisés pour juger les alternatives

Niveau 3- Les alternatives

Cette première étape est illustrée par la figure.5-5 du paragraphe suivant dans le problème de l'estimation des dommages d'un élément de structure pipe. Cette hiérarchie est également illustrée par un exemple présentée en annexe 4.

### **2<sup>ème</sup> Etape :**

Développer les matrices permettant de comparer, d'une part les critères entre eux situés au niveau 2 de la hiérarchie, nommées matrices des critères et d'autre part les alternatives par rapport à chaque critère, situées entre le niveau 2 et le niveau 3 de la hiérarchie et que l'on nomme matrices des alternatives, ou matrice de comparaison grâce à une échelle d'importance relative allant de 1 à 9, échelle de Saaty [39].

### **3<sup>ème</sup> Etape :**

Déterminer le poids ou la contribution des priorités de chaque matrice en calculant le déterminant. (Facteurs de priorités et facteurs de pondération pour le problème de l'estimation des dommages constaté d'un élément de structure pipe, dans le cas par exemple de la Piqûration, pertes d'épaisseurs, voir l'équation 5-1 du paragraphe 5-4-1-1 et tableau 5-2 et 5-8).

### **4<sup>ème</sup> Etape :**

Déterminer les priorités combinées des alternatives de manière linéaire. (Voir équation 5-1 du paragraphe 5-5-1-1).

### **5<sup>ème</sup> Etape :**

Calculer le degré de consistance qui déterminera la consistance de la décision et révélera l'éventuelle nécessité de réviser le jugement.

La méthode (AHP) teste la consistance d'un jugement par l'introduction du degré d'inconsistance limité au maximum à 10%. L'exemple traité en annexe 4, montre la valeur de consistance globale de la décision calculée et égale à 0.81, donc inférieure à 10%, ce qui signifie qu'il y'a moins de 8.1% d'inconsistance dans le jugement, ce qui est acceptable [45].

### **5.3.1.3. Avantages de la méthode (AHP)**

La méthode AHP présente les avantages suivants [46] :

- C'est une méthode analytique permettant de prendre des décisions dans le cas où plusieurs alternatives sont présentes
- C'est une méthode qui offre la possibilité d'éliminer une part importante du hasard dans le processus de la prise de décision
- C'est une méthode qui prend en compte aussi bien les facteurs concrets (mesurables) qu'abstraits d'une décision.
- C'est une méthode qui permet d'utiliser l'intuition et la réflexion de manière logique.

### **5.3.2. Implémentation de la méthode analytique de hiérarchisation**

La méthode d'évaluation des dommages peut être représentée comme une succession d'hiérarchies comme il est indiqué sur la (figure 5-5). Le niveau le plus élevé ou foyer de la hiérarchie est l'évaluation des dommages sur l'élément et qui est l'objectif principal.

Le niveau suivant est constitué de plusieurs éléments (état de service, état de sécurité, esthétique, coût des réparations...etc.). Ces éléments représentent les critères à partir desquels on jugera le niveau suivant de la hiérarchie, dans notre cas les signes de d'endommagement (piques de corrosion, perte d'épaisseur, fissure, cratère,...etc.). Le dernier niveau ou le niveau inférieur montre un ensemble de facteurs des dommages (profondeurs de piques, diamètres de piqûres, pertes d'épaisseurs, largeur fissure, densité de fissure, étendue des cratères,...etc) qui affectent les signes d'endommagement. Après avoir identifié ces facteurs qui influencent les résultats de l'évaluation des dommages sur l'élément de structure, il y'a lieu d'asseoir un procédé qui permettrait de dire parmi ces facteurs lesquels sont dominants et lesquels sont insignifiants. Cela est établi en parcourant la hiérarchie et en mettant en place des priorités pour les éléments à chaque niveau.

La première étape dans l'établissement des priorités des éléments, c'est de réaliser des comparaisons. Il s'agit d'une comparaison de pair d'éléments (i, j) similaires à chaque niveau de la hiérarchie en respectant le critère du niveau supérieur. Pour ce type de comparaison la forme matricielle est appropriée et pour remplir cette matrice à partir des comparaisons, une échelle de nombres allant de 1 à 9 a été utilisée pour représenter

l'importance relative d'un élément par rapport à un autre en respectant un certain attribut ou critère ou propriété.

D'après le procédé AHP [39], Les valeurs de 1 à 9 sont assignées par des experts du domaine de l'évaluation et sont définies comme suit :

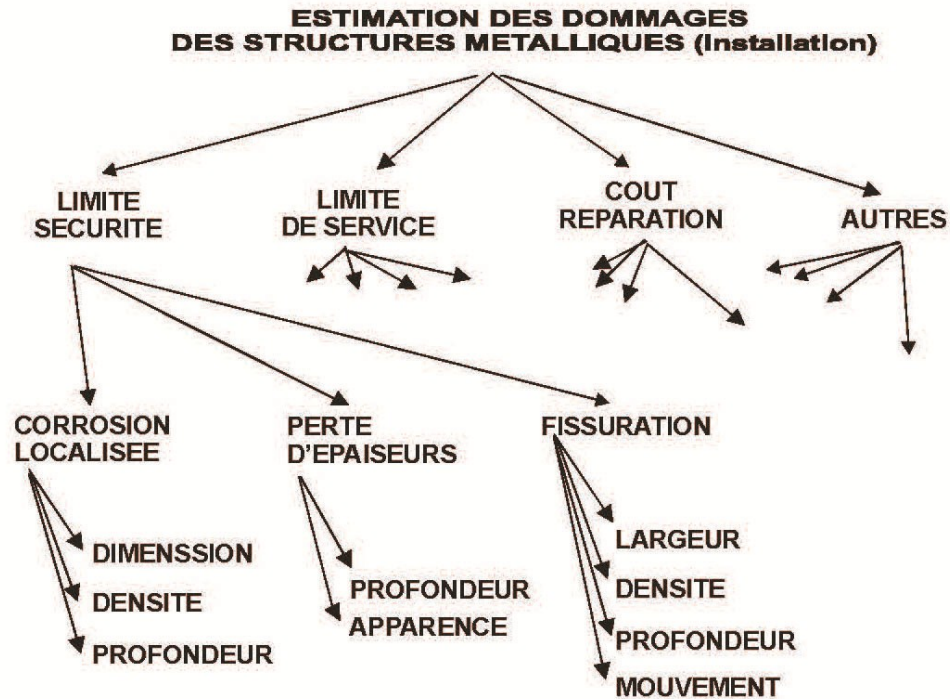
- 1 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément  $i$  par rapport à celle de l'élément  $j$  est *la même*, autrement dit  $i$  et  $j$  ont même importance.
- 3 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément  $i$  par rapport à celle de l'élément  $j$  est *faible à modérée*, en d'autres termes, l'expérience et le jugement suggère une légère préférence de l'un par rapport à l'autre.
- 5 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément  $i$  par rapport à celle de l'élément  $j$  est *fondamentale, essentielle ou forte*. Ce qui signifie que l'expérience et le jugement suggère une préférence élevée de l'un par rapport à l'autre.
- 7 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément  $i$  par rapport à celle de l'élément  $j$  est *fortement favorisée ou a été démontrée en pratique*.
- 9 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément  $i$  par rapport à celle de l'élément  $j$  est *absolue*. L'évidence favorisant l'élément  $i$  à l'élément  $j$  est une affirmation absolue.

Alors que les chiffres 2,4,6,8 représentent des degrés d'importance intermédiaires des niveaux précédemment définis. En fait ces valeurs favorisent le compromis.

Réciproquement, lorsque l'élément  $j$  est comparé à l'élément  $i$ , les valeurs inverses sont assignées. Exemple : Si le degré d'importance du premier élément ( $i=1$ ) d'une hiérarchie par rapport au second ( $j=2$ ) est égal à 3, revient à dire que réciproquement l'intensité d'importance du second élément par rapport au premier est égale à  $1/3$ .

La Figure 5-5 illustre la méthode de hiérarchisation analytique dans l'évaluation des dommages.





**Figure 5-5 :** Niveaux d'hierarchie de ECOR : Expert

## 5.4. RESULTATS ET DISCUSSION

### 5.4.1. CALCUL DE L'INDICE D'ENDOMMAGEMENT

L'évaluation des dommages dans notre projet est basée principalement sur le calcul de l'indice d'endommagement global lié directement aux observations visuelles de l'état des éléments de structure métallique et des mesures de leurs pertes d'épaisseurs.

Pour pouvoir évaluer les dommages causés par la corrosion, on a proposé une étude avec un système indiciel qui estime le degré du danger par calcul d'indice total à partir des indices partiels [47] :

- Indice de sévérité de piqûration  $I_p$
- Indice de sévérité de fissures  $I_F$
- Indice de sévérité de cratère  $I_{Cr}$
- Indice de sévérité de perte d'épaisseur  $I_{Uni}$

L'évaluation des dommages dans notre projet est basée principalement sur le calcul de l'indice d'endommagement global lié directement aux observations visuelles de l'état des organes métallique et des mesures de leurs pertes d'épaisseurs.

La sévérité des dommages est évaluée à partir des suppositions suivantes :

- 1) L'endommagement total dépend de la sévérité des dommages de chaque condition de dégradation (piqûre, cratère, perte d'épaisseur, fissures...etc.).
- 2) La sévérité du dommage de chaque signe de dégradation dépend de la sévérité de l'apparence de ce signe de dégradation.
- 3) Une échelle de 5 niveaux de sévérité est utilisée pour classer les dommages par introduction d'indices [38].
- 4) A chaque niveau de sévérité, ou indice correspond un descripteur littéral (très sévère, sévère, modéré, faible, très faible ou insignifiant). L'indice d'Endommagement ( $I_{Tot}$ ) est conçu pour guider l'ingénieur dans sa prise de décision relative au choix et au moment des réparations à effectuer sur l'élément du pipeline. L'Indice d'Endommagement permet d'orienter la décision de l'ingénieur de manière horizontale et verticale à travers la hiérarchie présentée sur la (Figure 5-5).

Cette méthode d'évaluation des dommages peut être représentée comme une succession d'hiérarchies. Le niveau le plus élevé ou foyer de la hiérarchie est l'évaluation des dommages est l'objectif principal. Le niveau suivant est constitué de plusieurs éléments (état de service, état de sécurité, esthétique, coût des réparations...etc.). Ces éléments représentent les critères à partir desquels on jugera le niveau suivant de la hiérarchie, dans notre cas les signes des dommages (corrosion par piquûre, état de surface, fissure, ...etc.). Le dernier niveau ou le niveau inférieur montre un ensemble de facteurs de dommage (diamètre et profondeur de piquûre, densité de piquûre, étendue,...etc) qui affectent les signes de dommage [48].

#### **5.4.1.1 Evaluation de l'indice d'endommagement par Piquûration**

Lorsqu'un pipeline est piquûré, plusieurs facteurs doivent être pris en compte dans l'évaluation de la sévérité de piquûration. Cela pourrait être le diamètre de l'ouverture de

piqûre, la profondeur de piqûre, Densité des piqûres. Une fois ces facteurs identifiés, on les classe selon leur influence ou leur priorité relative sur la sévérité de piqûre.

Le tableau 1 montre une matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la piqûration. Lorsqu'on compare un facteur avec lui-même, par exemple diamètre de piqûre avec diamètre de piqûre, le facteur est égale à 1. Par conséquent la diagonale de la matrice est formée de 1. Lorsqu'on compare un facteur avec un autre, dans ce cas le jugement des experts du domaine de l'évaluation intervient, il s'agira dans ce cas d'assigner des facteurs de priorités traduisant l'importance relative d'un facteur de piqûration par rapport à l'autre [49].

**Tableau 5-1:** Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la piqûration

Matrice diamètre maximale de piqûre observée (mm)	facteur de priorité		
	Profondeur de piqûre $p_{dp}$	Diamètre de piqûre $p_{dp}$	Densité de piqûre $p_{Dp}$
Profondeur de piqûre	1		
Diamètre de piqûre		1	
Densité de piqûre			1

Par soucis de simplification seuls les facteurs diamètre de piqûres et profondeur de piqûres (nombre de piqûres par unité de surface) seront considérés [49]. Chaque facteur est exprimés sous forme d'indice auquel est associée une sévérité, ces deux indices sont pondérés puis combinés pour donner l'indice de piqûration.

Le calcul de l'indice d'endommagement par piqûration s'effectue selon l'équation suivante

$$I_P = P_{dp} \cdot I_{dp} + P_{Dp} \cdot I_{Dp} \quad (5-1)$$

Avec  $I_P$  : indice d'endommagement de piqûre

$I_{dp}$  : indice d'endommagement diamètre piqûre

$I_{Dp}$  : indice d'endommagement profondeur de piqûre

$P_i$  : facteur de pondération de chaque de rupture définie par :

$$P_i = \sum_i \frac{p_i}{p_i} \quad (5-2)$$

Avec  $p_i$  : facteur de priorité ou d'importance évalués par les experts [43] à travers la méthode analytique de hiérarchisation. La pondération reflète le degré d'importance de chaque facteur de piqûration.

Le tableau 5-2 et 5-3 illustre différentes profondeurs et diamètres de piqûres avec des indices et des sévérités correspondantes. Au moment de l'estimation d'un élément de structure, il faudra relever la valeur de diamètres et profondeurs de piqûres maximale observées à la surface de l'élément, puis on la compare aux valeurs des tableaux.

**Tableau 5-2:** Indice & Sévérité des endommagements profondeur de piqûre

Index $I_{dp}$	Profondeur de piqûre comparée à l'épaisseur du pipe (%)	Sévérité
0	Pas de piqûre	aucune
2	$0\% < \text{profondeur} \leq 20\%$	Faible
3	$20\% < \text{profondeur} \leq 30\%$	Modérée
4	$30\% < \text{profondeur} \leq 50\%$	Sévère
5	$50\% < \text{profondeur} \leq 70\%$	Très sévère

Le tableau 3 montre les intervalles de diamètres maximaux de piqûre observée à la surface de l'élément, ainsi que leurs indices et description de sévérité associée. Plus le diamètre de piqûre augmente, plus sa sévérité augmente, et plus la potentielle corrosion croît [50].

**Tableau 5-3:** Indice & Sévérité des endommagements diamètre de piqûre

Index $I_{dp}$	Diamètre maximum de piqûre (mm)	Sévérité
0	No pit	aucune
1	$0 < D \leq 1$	Très faible
2,5	$1 < D \leq 2$	Faible
4	$2 < D \leq 3$	Modérée
5	$3 < D \leq 5$	Sévère

Pour déterminer les facteurs d'importances des piqûres  $P_i$  les hypothèses suivantes sont établies :

- Quand le diamètre de piqûre est évalué comme « très sévère » son influence sur l'endommagement total par piqûration est maximale ou absolue, sans tenir compte de la densité de piqûre.
- La sévérité de la profondeur de piqûre l'emporte dans le cas où le diamètre de piqûre est évalué comme « faible ».
- Dans les cas de figure restant on applique la méthode analytique d'hierarchisation.
- Les facteurs d'importance  $P_i$  sont indépendants de l'élément de structure considéré.

Les valeurs du tableau 4 sont estimées en considérant la contribution relative du diamètre de piqûre et de la profondeur de piqûre à l'endommagement par piqûration. Cette estimation est basée principalement sur un jugement d'experts dans le domaine de l'étude du comportement mécanique d'éléments de structure piqûré.

**Tableau 5-4:** Facteur de priorité entre la profondeur et le diamètre de piqûre

L'impact du Dommage par piqûre	Facteur de priorité	
	Profondeur de piqûre $p_{Dp}$	Diamètre de piqûre $p_{dp}$
Profondeur de piqûre	1	4
Diamètre de piqûre	1/4	1

Ainsi, il est considéré dans ce travail, selon une échelle d'importance relative de Saaty [46] que l'influence de la profondeur de piqûre est quatre fois plus importante que celle du diamètre de piqûre sur l'endommagement de l'élément par piqûration, et réciproquement, l'influence de la profondeur de piqûre correspond au quart de l'influence du diamètre de piqûre. Le tableau 5-5 montre les facteurs d'importance et de pondération finaux compte tenu des hypothèses précédemment énoncées.

**Tableau 5-5:** Facteur de priorité & Facteur de pondération

Case	Facteur de pondération		Facteur de priorité	
	$P_{Dp}$	$P_{dp}$	$p_{Dp}$	$p_{dp}$
1	1	0	1	0
2	0	1	0	1
3	4/5	1/5	4	1

$P_{Dp}$  : Facteur de pondération profondeur de piqûre

$p_{Dp}$  : Facteur de priorité profondeur de piqûre

$P_{dp}$  : Facteur de pondération diamètre de piqûre

$p_{dp}$  : Facteur de priorité diamètre de piqûre

**Cas 1** : Estimation des dommages profondeur de piqûre est « Très sévère »

**Cas 2** : Estimation des dommages profondeur de piqûre est « Faible »

**Cas 3** : Estimation des dommages profondeur de piqûre est « Modéré » ou «Sévère »

Ces facteurs, et les valeurs des indices respectifs de diamètre de piqûre et profondeur de piqûre sont injectés dans l'équation 5-1, pour calculer la valeur de l'indice fissure.

Le tableau 5-6 résume les différentes sévérités et indices correspondant à l'endommagement par piqûration

**Tableau 5-6:** Sévérités et indices correspondant à l'endommagement par piqûration

Indice de Piqûration $I_p$	Sévérité
0	Aucune
$0 < I_p \leq 3.5$	Modéré
$3.5 < I_p \leq 4.5$	Sévère
$4.5 \leq I_p$	Très sévère

#### 5.4.1.2 Evaluation de l'indice d'endommagement cratères de corrosion

Lorsque un pipeline a subi des dégradations causé par des cratères de corrosion, le facteur qui doit être pris en considération est celui de l'étendue de l'endommagement

Le tableau 5-7 présente les indices relatifs à cet endommagement [51].

**Tableau 5-7:** Indice & Sévérité des endommagements Etendue de cratère

Indice $I_{Cr}$	Etendue cratère par $dm^2$ (%)	Sévérité
0	Pas de cratère	Aucune
3	$0\% < \text{Etendue} \leq 10\%$	Modérée
4	$10\% < \text{Etendue} \leq 35\%$	Sévère
5	$35\% < \text{Etendue} \leq 50\%$	Très sévère

#### 5.4.1.3 Evaluation de l'indice d'endommagement par perte d'épaisseur

L'évaluation de la perte d'épaisseur sur la surface d'un pipeline tient compte d'un paramètre qui le taux de perte d'épaisseur comparé à l'épaisseur admissible déterminer par les conditions de service. Le tableau 5-8 décrit le taux de perte d'épaisseur observée avec un indice associé. La sévérité de perte d'épaisseur augmente avec le taux de ce dernier. Il ne faut pas que la perte d'épaisseur atteigne le seuil épaisseur minimale de service qui est calculée en fonction de la pression maximale de service selon expression 5-3. [52,53]

$$E = \frac{(P_{max} \cdot D)}{(R \cdot C)} \quad (5-3)$$

$E$  : Limite minimal d'épaisseur

$P_{max}$  : Pression maximale de service ( $kgcm^3$ )

$D$  : Diameter nominal (cm)

$R$  : Résistance du Matériaux ( $kgcm^2$ )

$C$  : Coefficient de sécurité

**Tableau 5-8:** Indice & Sévérité des endommagements de pertes d'épaisseur

Indice $I_{Unif}$	Taux de perte d'épaisseur %	Sévérité
0	Pas de perte	Aucune pénétration
1	Taux de perte $\leq 20\%$	pénétration faible
2	$20\% < \text{Taux de perte} \leq 40\%$	pénétration modérée
3	$40\% < \text{Taux de perte} \leq 70\%$	pénétration sévère
5	$70\% < \text{Taux de perte}$	Pénétration très sévère

#### 5.4.1.4 Evaluation de l'indice d'endommagement par fissuration

La principale source est d'ordre mécanique résultant de la température ; pression ; vibration ...etc. On distingue deux types de fissures en tenant compte de la forme du bout [54,55].

- Fissures en propagation : leur sommet est un pic elles sont très dangereuses.
- Fissures lentes : leurs sommet est plat ou arrondi, elles sont dangereuses.

La procédure de détermination de l'indice de fissuration est similaire à celle de la piqûration. Quand un élément structural est fissuré, plusieurs facteurs doivent être pris en compte dans l'évaluation de la sévérité de la fissuration. Cela pourrait être la largeur de fissure, l'étendue de fissure, la forme de l'extrémité de fissure. Une fois ces facteurs identifiés, on les classe selon leur influence ou leur priorité relative sur la sévérité de la fissure. Le tableau 5-9 montre une matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'à chacun d'entre eux sur la fissuration. Lorsqu'on compare un facteur avec lui-même, par exemple largeur de fissure avec largeur de fissure, le facteur est égale à 1. Par conséquent la diagonale de la matrice est formée de 1. Lorsqu'on compare un facteur avec un autre, dans ce cas le jugement des experts du domaine de l'évaluation des endommagements en intervient, il s'agira dans ce cas d'assigner des facteurs de priorités traduisant l'importance relative d'un facteur de fissuration par rapport à l'autre [43].

**Tableau 5-9:** Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'à chacun d'entre eux sur la fissuration

Largeur maximale de fissure observée (mm)	Facteur de priorité		
	$p_{Lf}$	$p_{Df}$	$p_{fext}$
Largeur de fissure	1		
Densité de fissure		1	
Forme extrémité fissure			1

Pour l'estimation du degré de sévérité de fissuration, on procédera de la même manière que pour le cas de piqûre. Chaque facteur est exprimé en terme d'indice largeur de fissure et



densité de fissure et forme d'extrémité de fissure, ces facteurs sont ensuite pondérés pour en déduire un indice final de fissure.

L'équation 4 permet le calcul de l'indice de fissure pondéré compte tenu des indices largeur et densité et forme extrémité de fissure.

$$I_F = P_{L_f} \cdot I_{L_f} + P_{f_{ext}} \cdot I_{f_{ext}} + P_{D_f} \cdot I_{D_f} \quad (5-4)$$

Avec

$I_F$  : indice d'endommagement de fissure

$I_{L_f}$  : indice d'endommagement largeur de fissure

$I_{D_f}$  : indice d'endommagement densité de fissure

$I_{f_{ext}}$  : indice d'endommagement forme extrémité de fissure

$P_i$  : facteur de pondération de chaque signe de d'endommagement définis par l'équation 5- 2

Le tableau 5-10 illustre différentes largeurs de fissures avec un indice et une sévérité correspondante. Au moment de l'estimation d'un élément de structure, il faudra relever la valeur de la largeur de fissure maximale observée à la surface de l'élément, puis on la compare aux valeurs du tableau 10.

**Tableau 5-10** : Indice & Sévérité des endommagements par la sévérité de largeur de fissure

Indice $I_{L_f}$	Largeur de fissure (mm)	Severity
0	0	aucune
1 – 2	$0,5 < L_F < 1$	Sévère
3 - 5	$L_F > 1$	Très sévère

Plus la largeur de fissure augmente et plus la sévérité augmente également, car il y'a un risque de corrosion sous tension phénomène synergique entre un phénomène mécanique et électrochimique du matériau [43].

Le tableau 11 montre les intervalles de densité de fissures possible observée à la surface de l'élément, ainsi que leurs indices et description de sévérité associée. Plus la densité de fissure augmente, plus sa sévérité augmente,

**Tableau 5-11 : Indice & Sévérité des endommagements densité de fissure**

Indice $I_{Df}$	Densité de fissure(%)	Sévérité
0	0	aucune
1-2	$0 < D_F < 3\%$	Sévère
3-5	$3\% < D_F$	Très sévère

Le tableau 5-12 montre les intervalles de des formes extrémité de fissures possible observée à la surface de l'élément, ainsi que leurs indices et description de sévérité associée.

**Table 5-12: Indice & Sévérité des endommagements par la forme de l'extrémité de fissure**

Indice $I_{fext}$	Forme d'extrémité	Sévérité
0	Pas de fissure	aucune
1-2	Arrondie ; plate	Sévère
3-5	Pic	Très sévère

Pour déterminer les facteurs d'importances des fissures ( $p_i$ ) les hypothèses suivantes sont établies :

1. Quand la largeur de la fissure est évaluée comme « très sévère » son influence sur l'endommagement total par fissuration est maximale ou absolue, sans tenir compte de la densité de fissures.
2. La sévérité de la densité de fissure l'emporte dans le cas où la largeur de fissure est évaluée comme « faible ».
3. Dans les cas de figure restant on applique la méthode analytique d'hierarchisation.
4. Les facteurs d'importance  $p_i$  sont indépendants de l'élément de structure considéré.

Les valeurs du tableau 5-13 sont estimées en considérant la contribution relative de la largeur de fissure et de la densité de fissure à l'endommagement par fissuration. Cette

estimation est basée principalement sur un jugement d'experts dans le domaine de l'étude du comportement mécanique d'éléments de structure métallique fissuré.

**Tableau 5-13:** Facteur de priorité entre largeur et densité de fissure

Influence du Dommage	Facteur de priorité		
	Largeur de fissure $p_{Lf}$	Densité de fissure $p_{Df}$	Forme extrémité de fissure $p_{fext}$
Largeur de fissure	1	4	4
Densité de fissure	$\frac{1}{4}$	1	4
Forme extrémité de fissure	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1

Ainsi, il est considéré selon une échelle d'importance relative de Saaty[45] que l'influence de la largeur de fissure est quatre fois plus importante que celle de la densité de fissure sur l'endommagement de l'élément par fissuration, et réciproquement, l'influence de la densité de fissure correspond au quart de l'influence de la largeur de fissure et au quart de l'influence de forme de l'extrémité de fissure [56,57].

Le tableau 5-14 montre les facteurs d'importance et de pondération finaux compte tenu des hypothèses précédemment énoncées.

**Tableau 5-14** Facteur de priorité & Facteur de pondération

Case	Facteur de pondération		Facteur de priorité	
	$P_{Lf}$	$P_{Df}$	$p_{Lf}$	$p_{Df}$
<b>1</b>	1	0	1	0
<b>2</b>	0	1	0	1
<b>3</b>	$\frac{4}{5}$	$\frac{1}{5}$	4	1

$P_{Lf}$  Facteur de pondération largeur de fissure  
 $P_{Df}$  Facteur de pondération densité de fissure

$p_{Lf}$  Facteur de priorité largeur de fissure  
 $p_{Df}$  Facteur de priorité densité de fissure

**Cas 1 :** Estimation des dommages largeur de fissure est « Très sévère »

**Cas 2 :** Estimation des dommages largeur de fissure est « Faible »

**Cas 3 :** Estimation des dommages largeur de fissure est « Modéré » ou «Sévère »

Ces facteurs, et les valeurs des indices respectifs de largeur de fissure et densité de fissure sont injectés dans l'équation 5-4, pour calculer la valeur de l'indice fissure.

Le tableau 5-15 résume les différentes sévérités et indices correspondant à l'endommagement par fissuration

**Tableau 5-15:** Indice & Sévérité des endommagements de fissuration

Indice de fissuration $I_F$	Sévérité
0	Aucune
$0 < I_F < 3,5$	Sévère
$3,5 < I_F$	Très sévère

#### 5.4.1.5 Evaluation de l'indice d'endommagement Total

La détermination de l'Indice d'Endommagement se fait en considérant les indices de piqûration, de présence de cratère de corrosion, de perte d'épaisseur et fissuration [58]. Le calculer l'indice  $I_{Tot}$  pondère d'un élément de pipeline s'effectue à travers l'équation 5-5 suivante.

$$I_{Tot} = P_P \cdot I_P + P_{Cr} \cdot I_{Cr} + P_{Unif} \cdot I_{Unif} + P_F \cdot I_F \quad (5-5)$$

$I_P$  : indice d'endommagement de piqûre

$I_{Cr}$  : indice d'endommagement cratère

$I_{Unif}$  : indice d'endommagement perte d'épaisseur

$I_F$  : indice d'endommagement de fissure

$P_i$  : facteur de pondération de chaque signe de d'endommagement définis par l'équation 2

Dans le cas de la détermination de l'indice d'endommagement total d'un élément de structure, l'importance relative de la piqûration, cratère, perte d'épaisseur et fissuration sont pris en compte par la matrice de priorité tableau 5-16. Ces facteurs de priorités proposés, représentent la contribution de chaque type dommage à l'endommagement total de l'élément de structure métallique respectant le critère de sécurité. La première colonne de la matrice de priorité décrit l'influence de cratère, perte d'épaisseur et fissuration par rapport au dommage par piqûration. [59,60]

- Les cratères de corrosion ont la même influence que la piqûration sur l'endommagement total de l'élément de structure.

- La perte d'épaisseur a une contribution légèrement inférieure à celle de la piqûration à l'endommagement total de l'élément de structure.
- La fissuration a influence nettement supérieure que la piqûration sur l'endommagement total de l'élément de structure.

**Tableau 5-16:** Facteur de priorité des différents types de dommages observés sur un élément structure

Limite de sécurité	Facteur priorité			
	Piqûret $p_F$	Cratère $p_{Cr}$	Perte d'épaisseur $p_{Unif}$	Fissure $p_F$
<b>Piqûration</b>	1	1	2	1/2
<b>Cratère</b>	1	1	1/2	1/3
<b>Perte d'épaisseur</b>	1/2	2	1	1/3
<b>Fissuration</b>	2	3	3	1

### Remarque

Si une ou plusieurs conditions de dégradation n'est pas développée, elle ne contribuera pas à l'endommagement total et par conséquent la valeur 0 est affectée aux facteurs de priorité. Le tableau suivant récapitule les facteurs de priorité de chaque condition d'endommagement normalisés par rapport aux piqûres de corrosion, ou dans le cas où aucun dommage n'est observé.

Le tableau 5-17 assigne à chaque indice une sévérité correspondante. Cette attribution de valeurs aux indicateurs permet de considérer raisonnablement la gravité relative de chaque endommagement. En effet, plus la valeur déductible est grande, plus la sévérité de l'endommagement est importante.

**Tableau 5-17:** Indice total calculé selon l'équation 5 et la sévérité associée

Indice total de dommage $I_{Tot}$	Sévérité
0	Aucune
$0 < I_{Tot} \leq 1$	Modéré
$1 < I_{Tot} \leq 2,5$	Sévère
$2,5 < I_{Tot}$	Très sévère

Dans le cadre de la présente étude, la détermination d'un Indice d'Endommagement total passe d'abord par le calcul avec l'expression 5-5 d'une valeur déductible pondérée de chaque dégradation présente. Cependant, la méthode d'évaluation d'endommagement ici présentée repose sur une approche élaborée par certains experts. La pondération par des indices de l'équation 5-5 répond à la connaissance de l'importance relative exacte de chaque indicateur. Afin d'affiner cette procédure de calcul, les coefficients et les valeurs des indices impliqués doivent être encore ajustés. L'approche de calcul discutée dans ce travail n'est pas nécessairement optimale, mais elle se révèle cohérente et complète à travers ses diverses étapes.

Comme mentionné ci-dessus, et comme alternative pour améliorer l'efficacité et donner un aperçu complet de la méthode proposée, le tableau 5-18 résume un cas réel d'évaluation des dommages causés aux canalisations.

**Tableau 5-18:** Etude de cas - scénario:- Estimation de dommage sur un pipeline

<b>Identification des dommages</b>							
Indice & sévérité	Piqûre de corrosion		Cratère	Perte d'épaisseur	Fissure		
	Profondeur	Diamètre	extent par dm <sup>2</sup> (%)	Taux	Largeur	Densité	Forme d'extrémité
	50%	2 mm	0	20%	0.8 mm	1%	pic
	Sévère	Modéré	Aucun	Modéré	Sévère	Sévère	Très sévère
Facteur de priorité	4	1	0	1	4	1	1
Facteur de pondération	4/5	1/5	0	1	4/6	1/6	1/6
<b>Indice</b>	4	2.5	0	2	2	1	3
	$4 \times 4/5 + 2.5 \times 1/5 = 3.7$		0	2	$2 \times 4/6 + 1 \times 1/6 + 3 \times 1/6 = 2$		
	Sévère		Aucun	Modéré	Sévère		
Facteur de priorité	2		0	1	3		
Facteur de pondération	2/6		0	1/6	3/6		
<b>Indice Total</b>	$2/6 \times 3.5 + 0 \times 0 + 1/6 \times 2 + 3/6 \times 2 = 2.5$						
<b>Sévérité Total</b>	Sévère						

## **CONCLUSION**

L'Indice d'Endommagement est un indicateur qui permet de quantifier l'endommagement en fonction des différents signes de dégradation. En utilisant les données des inspections visuelles effectuées a priori sur un élément de pipeline.

Les indices développés dans le cadre de ce travail visent à éliminer la subjectivité de l'ingénieur dans la détermination des lignes de pipeline qui nécessitent des interventions prioritaires, en approfondissant l'évaluation de chaque phénomène avec des classements exhaustifs. Ainsi, que ce soit avec l'Indice de piqûre ( $I_P$ ), de cratère de corrosion ( $I_{Cr}$ ), perte d'épaisseur ( $I_{Unif}$ ) ou de fissure ( $I_F$ ), il est possible de confronter objectivement sur une même échelle tous les paramètres de l'endommagement qui sont susceptibles d'influencer la durabilité du pipeline.

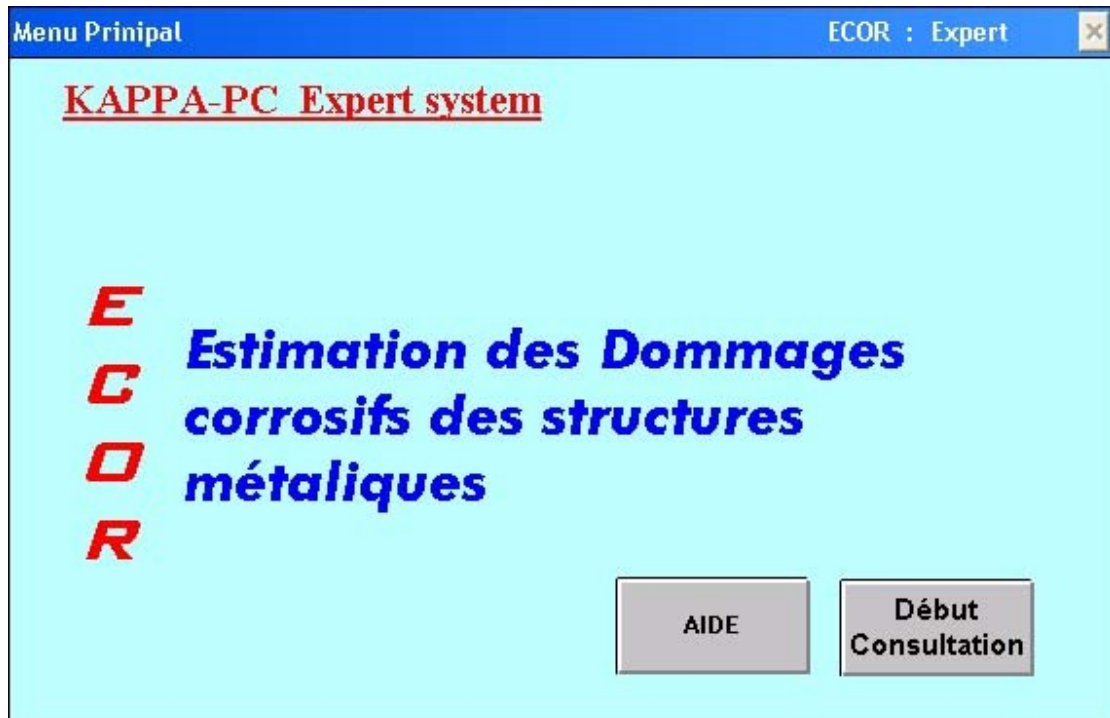
La méthodologie présentée repose sur une approche de calcul qui utilise les divers indices de manière rationnelle. Cependant, la sensibilité du modèle a été vérifiée, raison pour laquelle l'utilisation de l'Indice d'Endommagement décrit doit se faire avec les précautions nécessaires. De même, les divers indices présentés devront probablement être ajustés afin de raffiner le système.

Pour terminer, l'Indice d'Endommagement est un outil qui oriente mais qui ne fixe pas la décision de l'ingénieur responsable des inspections. En effet, même s'il est tentant de se laisser emporter par le verdict qui émane du module informatique développé, il faut maintenir à l'esprit qu'aucun outil ou méthodologie de ce genre ne peut surpasser le jugement final d'un ingénieur.

## **ANNEXE 1**

### ***INTERFACES***





Fiche MENU IDENTIFICATION CLIENT ECOR : Expert

**FICHE CLIENT**

Code inspecteur  Date

Client

Service

Personne rencontrée  Fonction

Adresse

Tél  Fax

**IDENTIFICATION DE LA INSTALLATION**

Secteur  Zone

Adresse de la structure à inspecter

Date de mise en service  Date d'observation du cas de corrosion

Date d'arrêts eventuels  Durée  Motif

Autres renseignements utiles

**ECOR : Expert** Aide Suivant

Menu DESCRIPTION INSTALLATION EDES :Expert

<p><b>Partie inspecté</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Conduite_pipeline</p> <p><input type="radio"/> Tête_puits</p> <p><input type="radio"/> Tubing</p> <p><input type="radio"/> Collecteur</p> <p><input type="radio"/> Equipements_surfaces_puits</p>	<p><b>Nuance du matériau utilisé</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Acier_au_carbone</p> <p><input type="radio"/> Acier_inox_austénitique</p> <p><input type="radio"/> Acier_inox_ferritique</p> <p><input type="radio"/> Acier_inox_martensitique</p>	<p><b>Système de protection</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Inhibiteurs</p> <p><input type="radio"/> Protection_cathodique</p> <p><input type="radio"/> Protection_anodique</p> <p><input type="radio"/> Revêtements</p>
<p><b>Nature du fluide transporté</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Gaz</p> <p><input type="radio"/> Huile</p> <p><input type="radio"/> eau</p> <p><input type="radio"/> multiphasique</p>	<p><b>Analyse du fluide</b></p> <p>CO2 <input type="text"/> Sulfures <input type="text"/></p> <p>H2S <input type="text"/> Bactéries <input type="text"/></p> <p>O2 <input type="text"/> Résistévité <input type="text"/></p> <p>BSW <input type="text"/></p>	<p>Date de mise en place <input type="text"/></p> <p>Sable <input type="text"/></p> <p>Viscosité <input type="text"/></p>
<p>Vitesse d'écoulement <input type="text"/></p> <p>Pression de service <input type="text"/></p> <p>Température de service <input type="text"/></p>	<p>Débit <input type="text"/></p> <p>Densité <input type="text"/></p>	<p><input type="button" value="Suivant"/></p> <p><input type="button" value="Précédent"/></p> <p><input type="button" value="AIDE"/></p>

**ECOR : Expert**

Menu ORGANE DE L'INSTALLATION ECOR : Expert

**ESTIMATION DES DOMMAGES SUR PIPELINE**

Appellation du pipe

Repère  Date de mise en service

**Caractéristique**

Longueur totale (m)  Diamètre (cm)

Epaisseur ep (mm)  Nombre de cordon de soudure

**Etat descriptif**

Element\_soudé\_de\_bout\_en\_bout

Element\_bridé

Element\_en\_une\_seul\_pièce

**L'organe inspecté etait il soumis**

à\_des\_vibrations

à\_des\_contraintes

Autres précisé..

**ECOR : Expert**

**Méthode d'inspection**

Visuelle

Contrôl\_non\_destructif

Contrôl\_destructif

**Type de Dommages constatés**

Corrosion\_uniforme

Piqûres\_corrosion

Cratère\_corrosion

Fissuration

Percements

## **ANNEXE 2**

### **BASE OBJETS**

## **BASE OBJETS**

<b>Classes(Class)</b>	<b>Attribut (Slots)</b>	<b>Valeurs (Values)</b>
<b>Installation</b>	composants  emplacement  Productions	Pipe_line, Tubing, Collecteur, Tête_colonne, Séparateur, autres  Variable  Gaz, huile
<b>Matériau</b>	Acier au carbone Acier martencitique Acier austenitique Acier austeno ferritique	Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non
<b>Pipe line</b>	Aérien Enterré Immergé_eau Revêtement Protection_cathodique Traitement_inhibiteurs	Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non
<b>Forme_Corrosion</b>	corrosion_uniforme corrosion_piqûres corrosion_feuilletante corrosion_caverneuse corrosion_aération_différentiel le corrosion_érosion_cavitation corrosion_bactériologique	Oui , Non Oui , Non Oui , Non Oui , Non Oui , Non Oui , Non Oui , Non
<b>Matériau</b>	Type_Matériau  Etat_Matériau Etat_Surface Condition_Sollicitation	Acier_carbone, Acier auteno_martensetique, acier_martensitique, Acier_austenitique .....7 Rugueux, lisse , miroir Statique , cyclique , vibratoire, autres
<b>Milieu</b>	Atmosphère Nature Aération pH Température	Acide, Neutre, Basique, autres Chloruré, Nitruré, Sulfaté, autres Oui, Non Variable Variable

<b>eau</b>	Eau_mer Eau_douce	Oui, non Oui, non
<b>Eau_de_mer</b>	Teneur_chlore Température pH bactéries	Variable Variable Variable Oui,non
<b>Eau_douce</b>	Température PH Bactéries Teneur_chlore Teneur_sulfate Teneur_nitrures	Variable Variable Oui, non Variable Variable Variable
<b>Bactéries</b>	Bactéries_fer BSR Autre	Oui, non Oui, non Oui, non
<b>milieu corrosif</b>	Gaz Eau Huile Multiphasique Autre	Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non
<b>Multiphasique</b>	Régime_écoulement Vitesse_écoulement Pression Débit Proportion_eau Proportion_huile Proportion_boue Proportion_gaz Température PH Bactéries Teneur_chlore Teneur_sulfate Teneur_nitrures	Turbulent, laminaire Variable Moyenne, élevée, faible Moyen, haut, bas Variable Variable Variable Variable Variable Variable BSR, Bactéries_fer Variable Variable Variable

<b>Type_Dommage</b>	Domage_Constaté	Piqûration, Fissuration, Crevasse, autres
<b>Domage_Piqûration</b>	Indice_Piqûration Severite_Piqûration Sévérité_ProfondeurPiqûre Sévérité_DensitéPiqûre Indice_ProfondeurPiqûre Indice_DensiteFissure coefficient_piquration potentiel_piquration potentiel_corrosion	Calculer (Méthode) Aucune, Faible, Modéré, Sévère, très_Sévère Aucune, Faible, Modéré, Sévère, très_Sévère Aucune, Rare, Intermittente, Etendue, Partout 0, 1, 2.5, 4, 5 0, 1, 2, 3, 4, 5 $F_p = L_{max} / L_{av}$ Variable Variable
<b>Piqûration</b>	Localisation Profondeur Densite-Fissure	Au_centre, Aux_extremités Superficielle, légère_profond, très profonde Variable
<b>Forme_dommage</b>	Corrosion erosion Fluage Aures	Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non
<b>Corrosion_localisée</b>	Corrosion_piqûres Corrosion_crevasse Corrosion_fissures Corrosion_érosion	Oui, non Oui, non Oui, non Oui, non
<b>Type_dommage</b>	Corrosion	Uniforme, localisée
<b>Air_ambiant</b>	Température Humidité Vents Bactéries Ions_agressifs	Variable Variable Oui, non Oui, non Chlore, sulfates, Nitrures, autres
<b>Sol</b>	Température PH Humidité Bactéries Ions_agressifs	Variable Variable Variable Oui, non Chlore, sulfate, nitrure, autres
<b>Domage_corrosion_intergranulaire</b>	alliage_passivable existence_joint_grains	Oui, non Oui, non

	cabure_chrome _joints_ grains Température Concentration_chrome potentiel traitement_thermique soudage Teneur_carbone	Oui, non variable élevé, faible variable Oui, non Oui, non supérieur à 0.03%, inférieur à 0.03%
<b>Corrosion_crevasses</b>	localisation densité revêtement existence_d'interstices	Au centre, aux_extrémités Aucune, faible, modérée, dense/très dense Oui, non Oui, non
<b>Dommmage_corr_crevasses</b>	Température_critique	Variable
<b>Corrosion_galvanique</b>	Nature_métal_plus_noble Nature_métal_moins_noble Potentiel_corrosion Superficie	variable variable variable petit, moyenne, très grande
<b>Corrosion_fissuration</b>	Nombre_fissures Orientation_fissuration Nature_fissuration	Considérable, moyen, a_peine_perceptible, aucune <b>Haut, bas, incliné</b> Inter_granulaire, trans_granulaire
<b>Dommmage_fissuration</b>	Contraintes_internes Traitements_thermiques Contraintes_externes	<b>Laminage, filage, emboutissage, soudage...</b> Trempe, vieillissement, écrouissage, autres Traction, cisaillement, compression, intermittentes, aucune
<b>Corrosion-bacterienne</b>	<b>Localisation</b> Sévérité_corrosion Profondeur_corrosion	<b>Au centre, aux_extrémités</b> Aucune, faible, modérée, sévère, très_sévère Superficielle, légère, profonde, très profonde

**ANNEXE 3**

***BASE DES REGLES***



#### REGLE PERTE D EPAISSEUR 1

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** la vitesse d'écoulement est inférieur à 1,5 m /s  
**then** la vitesse de perte d'épaisseur diminue avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement

#### REGLE PERTE D EPAISSEUR 2

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** la vitesse d'écoulement est supérieur a 1,5  
**then** la vitesse de perte d'épaisseur augmente avec la vitesse d'écoulement

REF MD MEDIA N°5 JAN 99

#### REGLE PERTE D EPAISSEUR 3

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** la vitesse d'écoulement est comprise entre 1 et 2 m/s  
**then** la corrosion et l'érosion sont minimales

REF MD MEDIA N°5 JAN 99

#### REGLE ECOULEMENT 1

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** la différence de pression amont aval est importante  
**then** la vitesse d'écoulement et le flashing sont importants

REF MD MEDIA N°20 OCT 2002

#### REGLE DEPOTS 1

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** présence d'une forte concentration de Baryum dans le pétrole  
**and** présence d'une forte concentration de sulfates dans les eaux d'injection  
**then** il y a formation de dépôts dans les conduites en réduisant le diamètre (plus de 50%)

REF MD MEDIA N°20 OCT 2002

#### REGLE REHABILITATION DE PIPES ABONDONNES 1

**if** l'examen visuel d'un pipe abandonner nous a permis de décider qu'il est à récupérer  
**and** la perte d'épaisseur est faible  
**then** le pipe doit subir une protection cathodique pour le mettre en fonction

**if**  
**then** la perte d'épaisseur est moyenne  
**sinon** le pipe doit être utilisé comme canalisation pour le réseau d'eau  
le pipe est a recycler ou utilisé comme support  
REF MD MEDIA N°18 AVR 2002

#### REGLE REHABILITATION DE PIPES ABONDONNES 2

**if** un pipe récupéré est mis en service et protégé catholiquement  
**and** les critères de sélection sont importants  
**then** on peut enterrer cette conduite  
**sinon** on le met aérien  
REF MD MEDIA N°18 AVR 2002

#### REGLE REHABILITATION DE PIPES ABONDONNES 3

**if** un pipe récupéré est mis en service et protégé catholiquement  
**and** les critères de sélection pour détermination de la pression de service  
sont importants  
**then** le pipe doit être destiné pour réseau d'huile à haute pression  
  
**sinon** il doit être destiné pour réseau d'huile à faible pression  
REF MD MEDIA N°18 AVR 2002

#### REGLE PROTEECTION CATHODIQUE 1

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** on a des courts tronçons de conduites à protéger à l'extérieur  
**then** la meilleure méthode c'est d'utiliser la protection cathodique par  
courant imposé  
**sinon** utiliser la protection cathodique par anode réactives  
REF MD MEDIA N°12 OCT 2002

#### REGLE PROTEECTION CATHODIQUE

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** le pipe est nue ou son revêtement est détérioré  
**then** utiliser la protection cathodique (méthode off-on : le critère de  
100 mV )  
  
**or**  
**sinon** utiliser la protection cathodique (méthode de 300 mV)  
utiliser la protection cathodique (méthode de 850 mV)  
REF MD MEDIA N°12 OCT 2002

#### REGLE ASPECT DE CORROSION 1

**if** la conduite est un pipe multi phasique en acier au carbone  
**then** la conduite se corrode d'une façon uniforme

**sinon** elle se corrode d'une façon localisée (piqûres crevasses )

REF OUVRAGE Mr HAMBLI MARS 2001

REGLE piquûres 1

**if** le métal est un alliage passivable  
**and** le milieu est chloruré  
**and** le potentiel de corrosion est supérieur au potentiel de piquûre  
**then** la corrosion par piquûre commence

REF ANTI CORROSION

REGLE PIPE 1

**if** il y a présence de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>S dans le pipe a gaz  
**and** il y a présence de l'eau  
**then** la corrosion se déclenche sur la partie inférieur du pipe

REF MD MEDIA N° 4 SEPT 98

REGLE PIPE 2

**if** la conduite est un pipe multi phasique posée sur le sol  
**then** la corrosion se manifeste dans la partie inférieur interne et aussi dans la partie au contact avec le sol

REF MD MEDIA N° 4 SEPT 98

REGLE PIPE 3

**if** a conduite est un pipe multi phasique posée sur le sol  
**and** la formation de l'électrolyte demeure et la concentration en H<sup>+</sup> est favorable  
**and** les bactéries sont pressentes  
**then** la perte d'épaisseur est continue

REF MD MEDIA N° 4 SEPT 98

REGLE PIPE 4

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** la vitesse d'écoulement est très importante  
**then** la formation d'électrolyte diminue

REF MD MEDIA N° 4 SEPT 98

REGLE PIPE 5

**if** la conduite est un pipe multi phasique  
**and** l'épaisseur du pipe sous pression atteint l'épaisseur minimale de rupture (loi 1 donnée)

**then** une fuite aura lieu

REF MD MEDIA N° 4 SEPT 98

## **ANNEXE 4**

### **ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS AHP**

## **La méthode analytique de hiérarchisation AHP**

### ▪ **Extrait de SAATY**

*« Lors de la résolution des problèmes par une analyse logique et explicite on distingue trois principes : construction d'une hiérarchie, établissement des priorités, cohérence logique.*

*Les êtres humains ont la capacité de percevoir les choses et les idées, de les identifier et de communiquer ce qu'ils observent. Pour une connaissance plus détaillée, nos cerveaux structurent une réalité complexe dans ses parties constitutives, et à leurs tour ces parties sont structurées suivant leurs propres parties constitutives et ainsi de suite en respectant une hiérarchie.*

*Les êtres humains possèdent également la faculté de percevoir les relations entre les objets qu'ils observent, de comparer des paires d'objets similaires par rapport à certains critères ou propriétés et de distinguer entre les constituants d'une même paire en appréciant l'intensité de leurs priorités ou préférences. Le résultat de cette distinction est 'un vecteur de priorité' ou une importance relative des éléments par rapport à chaque propriété. Dès lors, ils synthétisent leur appréciation à travers l'imagination ou à travers un nouveau procédé logique , exemple AHP (Analytical Hierarchy Process) et accèdent ainsi à une meilleure compréhension du système tout entier.*

*Les êtres humains ont aussi la capacité d'établir des relations ou des rapports entre les objets et les idées, de telle manière à ce qu'ils soient cohérents entre eux, c'est à dire à ce que les rapports entre eux exhibent une certaine cohérence. La cohérence s'explique de deux façons :*

*1- les idées ou les objets similaires sont regroupés ou classés selon leur homogénéité et leur applicabilité.*

*2-Les intensités des relations entre les idées et les objets basées sur un critère particulier se justifient les uns par rapport aux autres d'une manière logique.*

*Le procédé (AHP) est un modèle flexible qui permet aux individus ou groupes de former des idées et de définir des problèmes en élaborant leurs propres propositions et aboutir à la solution attendue ou désirée. Ce procédé permet également aux individus de tester la sensibilité ou la sensibilité de la solution ou des résultats.*

*Le procédé (AHP) s'accommode bien avec la nature de l'homme, et ne nous force pas à adopter un mode de pensée qui pourrait aller à l'encontre de notre appréciation. AHP marie l'estimation et les valeurs personnelles d'une manière logique. Ce procédé utilise d'une part l'imagination, l'expérience et la connaissance pour structurer un problème, et d'autre part, la logique, l'intuition et l'expérience pour fournir une appréciation.*

*AHP est assez flexible pour permettre la révision des décisions qui ont été prises par les décideurs. Ces derniers peuvent extrapoler ou étendre les éléments de la hiérarchie d'un problème et changer leur estimation ou leur jugement.*

*Une autre caractéristique de ce procédé est qu'il fournit une base d'étude pour un groupe participant à la prise de décision ou à la résolution d'un problème. Leurs idées et leurs appréciations peuvent être remises en questions, elles peuvent être renforcées ou au contraire affaiblies par des preuves présentées par d'autres personnes. Le groupe peut contribuer à la justesse ou à la force du résultat. Ainsi, l'on pourrait inclure dans le procédé toute information dérivant scientifiquement ou intuitivement.*

*AHP est un procédé de 'rationalité systémique' : il nous permet de considérer un problème en temps qu'ensemble et d'étudier les interactions simultanées de ses composants dans la hiérarchie ».*

#### ▪ Exemple : Achat d'une maison

L'exemple traité ci dessous concerne le choix d'achat d'une maison lorsque plusieurs maisons sont disponibles présentant chacune un certain nombre de caractéristiques interdépendantes et de nature différente. Tout le problème réside dans l'établissement d'une hiérarchie ou d'une structure qui définit le problème dans son ensemble en

relatant les différents critères auxquels satisfont les maisons, ainsi que l'établissement de priorités ou de comparaisons de ces critères entre eux, et la comparaison des différentes alternatives offertes par rapport à chaque critère.

L'application de la méthode (AHP) permet de sélectionner en définitif la maison ou l'alternative la plus satisfaisante donc celle présentant la priorité la plus importante.

Le niveau 1 représente l'objectif à atteindre c'est à dire la maison la plus satisfaisante.

Le niveau 2 représente les critères utilisés qui entrent dans le choix d'une maison à savoir, sa superficie, la localisation ou proximité des arrêts de bus, le voisinage, l'âge de la maison, la superficie de la cour, les facilités modernes, les disponibilités financières, l'état générale.

Le niveau 3 représente les alternatives, dans ce cas la maison A, B et C.

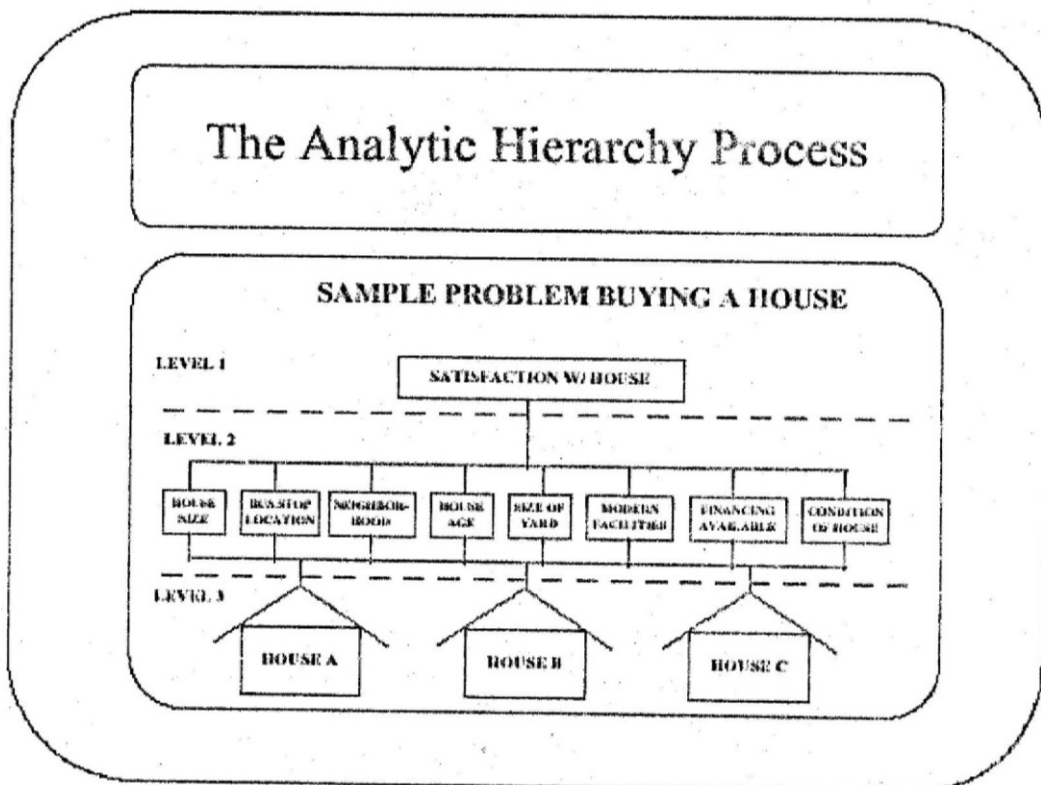


Fig 4-1 Définition et hiérarchisation du problème

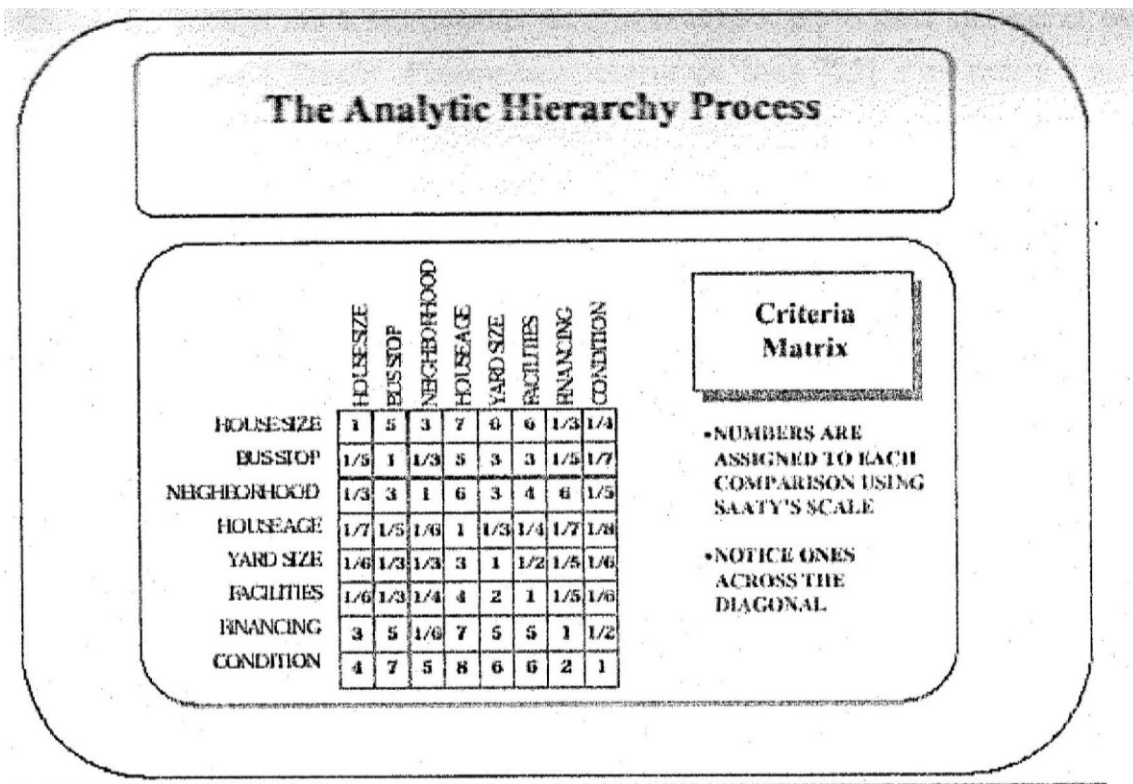


Fig 4-2 Matrice des critères

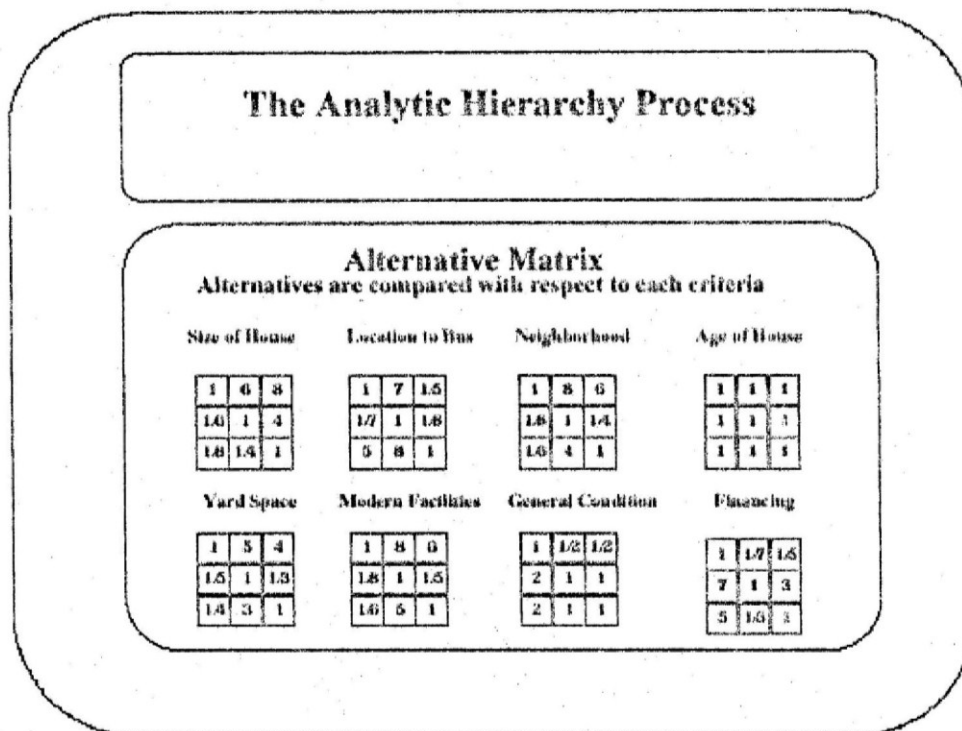


Fig 4-3 Matrice des alternatives



La matrice des critères assoit les priorités de chaque critère par rapport aux autres en utilisant des nombres ( Echelle d'importance relative de Satty [22] d'un critère  $i$  par rapport à un critère  $j$ ).

La première ligne de la matrice des critères donne la priorité du critère superficie de la maison par rapport à lui même et par rapport aux autres critères par le biais de couples de comparaison. Le premier couple ( $i=1, j=1$ ) donne la valeur 1, c'est à dire le critère superficie de la maison a la même intensité de priorité que lui même, ce qui est logique ; il y va de même pour toute la diagonale de la matrice qui compare les couples de même nature. Le second couple ( $i=1, j=2$ ) a la valeur 5, ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme essentiellement plus important que celui de la localisation a proximité des moyens de transport (bus). Le troisième couple ( $i=1, j=3$ ) a la valeur 3, ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme faiblement à modérément plus important que celui du voisinage. Le dernier couple de la ligne 1 ( $i=1, j=8$ ) a la valeur  $1/4$ , ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme modérément à fortement moins important que celui de l'état générale de la maison, c'est dire que le critère de l'état général de la maison est modérément à fortement plus important que celui de la superficie de la maison ( valeur inverse du couple ( $i=8, j=1$ ) ). La première colonne de la matrice a les valeurs inverses de la première ligne. La matrice des critères est une matrice symétrique.

Les matrices des alternatives donnent une comparaison des trois alternatives ou maisons disponibles par rapport à chacun des critères précédemment énumérés. La première ligne de la matrice des alternatives par rapport au critère de la superficie de la maison compare la maison A à la maison B et C. La maison A est beaucoup plus grande que la maison B et nettement plus grande que la maison C. La quatrième matrice est unitaire, c'est dire que les trois maisons ont le même âge.

### **Décision finale**

Après avoir calculé les poids des priorités de chaque matrice et après combinaison linéaire, le vecteur de priorité est obtenu.

A	.396
B	.341
C	.263

Le choix se porte sur la maison A car elle a la plus forte priorité (0.396).

Après calcul, la valeur de consistance global du jugement est égale à 8,1%. Cette valeur est inférieure à 10%, or d'après SAATY, lorsqu'il y'a moins de 10% d'inconsistance dans le jugement, celui-ci est considéré comme acceptable.